

VIII. KONFERENZ DER DONAULÄNDER  
ÜBER HYDROLOGISCHE VORHERSAGEN

VIII KONФЕРЕНЦИЯ ПРИДУНАЙСКИХ СТРАН ПО  
ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ ПРОГНОЗАМ

Regensburg / Регенсбург — 29. 9.—4. 10. 1975

KONFERENZBERICHT  
СБОРНИК ДОКЛАДОВ

NATIONALKOMITEE DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND  
FÜR DAS INTERNATIONALE HYDROLOGISCHE PROGRAMM  
DER UNESCO

Издание  
НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА  
ФЕДЕРАТИВНОЙ РЕСПУБЛИКИ ГЕРМАНИИ  
ПО МЕЖДУНАРОДНОЙ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЕ ЮНЕСКО

Koblenz — Кобленц  
1977



VIII. KONFERENZ DER DONAULÄNDER  
ÜBER HYDROLOGISCHE VORHERSAGEN

VIII КОНФЕРЕНЦИЯ ПРИДУНАЙСКИХ СТРАН ПО  
ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ ПРОГНОЗАМ

Regensburg / Регенсбург 29. 9.—4. 10. 1975

KONFERENZBERICHT  
СБОРНИК ДОКЛАДОВ

Bearbeitet von U. de HAAR

Unter Mitwirkung von B. Nett  
und dem IHP-Redaktionsausschuß

Под редакцией У. де ГААР  
при содействии Б. Нетт  
и редакционного комитета МГП

Herausgegeben vom  
NATIONALKOMITEE DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND  
FÜR DAS INTERNATIONALE HYDROLOGISCHE PROGRAMM  
DER UNESCO

Издание  
НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА  
ФЕДЕРАТИВНОЙ РЕСПУБЛИКИ ГЕРМАНИИ  
ПО МЕЖДУНАРОДНОЙ  
ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЕ ЮНЕСКО

Koblenz — Кобленц  
1977

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Vorwort	6/7
Eröffnungssitzung	8/9
<b>1. <u>Kurzfristige Wasserstands- und Abflußvorhersagen, insbesondere für Hochwässer</u></b>	<b>39</b>
Generalbericht - Hladny/Buchtele -	41
Bartha, P.                      Vorhersage des Abflußbeiwertes	47
Beltschikow, W.A.            Anwendung eines mathematischen Modells bei der Erstellung von Regenhochwasservorhersagen	55
Kresser, W. Gutknecht, D.                Untersuchung über die Entstehung und das Ausmaß von Fehlern beim Aufbau eines Niederschlags-Abfluß-Modells für Zwecke der Hoch- wasservorhersage	65
Anderl, B. Attmannspacher, W. Schultz, G.A.                Die Vorhersage von Hochwasserganglinien in kleinen Einzugsgebieten aus Regenmessung mit Radar	79
<u>1. Diskussion</u>	93
Kirnbauer, R.                Erfahrungen mit dem Kalinin-Miljukow-Verfahren an einem Teilstück der österreichischen Donauastrecke	97
Sosedko, M.N.                Kontinuierliche Vorhersagen von Regenhochwasserabflüssen am Dnjestr und seinen Gebirgszuflüssen	111
Hinku, S. Duma, D. Dan, P.                        Die Anwendung der numerischen Simulation bei der Vorhersage von Hoch- wässern an der Donau	119
Martinka, K. Zezulák, J.                    Kinematisches Flußmodell für Hochwasserwellenbewegungen in natür- lichen Gerinnen	127
Befani, N.F.                 Prinzipielle Grundlagen und Methodik der Vorhersage für Scheitel- abflüsse und Hochwasserganglinien von Gebirgsflüssen	141
Djordjevic, N.T.             Vorhersage von Hochwassern, die durch Regen und gleichzeitige Schneeschnmelze verursacht werden	149
<u>2. Diskussion</u>	159
Simo, E.                      Zur Problematik der Modelle für indirekte Auswertung von Wasser- vorräten in der Schneedecke	163
Muchin, W.M.                Einige stabile Methoden zur Lösung einer Umkehraufgabe hydrologischer Vorhersagen	171
Lylo, W.M. Shidkova, L.W.               Vorhersage der Abflußganglinie von Regenhochwässern im Einzugsgebiet der Theiß auf der Grundlage von Niederschlag-Abflußbeziehungen	179
<u>3. Diskussion</u>	187
Nemec, I.                     Vergleichende Untersuchungen hydrologischer Vorhersagemodelle	191
Andelić, M.                  Kurzfristige Abflußvorhersage für einen jugoslawischen Donauabschnitt	193
Ocokolić, M.                 10-Tagesabflüsse im Unterlauf der Save und ihre Vorhersagemöglichkeiten	205
Podani, M.                  Wirtschaftliche Aspekte hydrologischer Prognosen	219
<u>4. Diskussion</u>	231
<b>2. <u>Langfristige Wasserstands- und Abflußvorhersagen</u></b>	<b>235</b>
Gruber, O.                    Die Abflußdargebotsfunktion des Einzugsgebietes, gegeben durch die Ganglinien des n-jährigen Abflusses und der Überschreitungsdauer des Abflusses	237
Saposhnikow, W.I.            Langfristige Vorhersage von Hochwasserganglinien großer Flüsse	253
Franke, P.G. Spiegel, R.P.                Strukturprognosen für den durch Speicher veränderten Abfluß	261
Rösl, G.                     Mathematisches Modell zur Vorhersage des Abflußgeschehens in der bayerischen Donau nach dem Ausbau mit Staustufen	271
<u>5. Diskussion</u>	285
Prohaska, S.                 Abhängigkeit zwischen mittlerem Jahresabfluß der Flüsse Jugoslawiens und der Charakteristik der atmosphärischen Kreislaufprozesse sowie der Sonneneinstrahlung	291

## С О Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
Предисловие	6/7
Открытие	8/9
<u>1. Краткосрочные прогнозы уровней и расходов воды, особенно при паводках</u>	39
Генеральный доклад - Гладны/Бухтеле	41
Барта П.	47
Прогноз коэффициента стока	
Бельчиков В.А.	55
Использование математической модели формирования дождевых паводков при разработке оперативных схем прогнозов	
Крессер В. Гуткнехт Д.	65
Исследование возникновения и размер неточностей при создании модели осадков и стоков для составления паводочных прогнозов	
Андерль Б. Атманспахер В. Шульц Г.А.	79
Прогнозирование линий хода паводков в небольших бассейнах по радарным измерениям атмосферных осадков	
<u>1. Дискуссия</u>	93
Кирнбауер Р.	97
Приобретение при помощи метода Калинина-Милюкова, опыты на одном из Австрийских участков Дуная	
Соседко М.Н.	111
Непрерывные прогнозы расходов дождевых паводков на горных реках, основанные на учете процессов, происходящих в русловой сети	
Хынку С. Дума Д. Дан П.	119
Использование числовой симуляции в прогнозировании паводков на Дунае	
Мартинка К. Зезулак И.	127
Кинематическая речная модель неустановившегося движения воды в естественных руслах	
Бефани Н.Ф.	141
Принципиальные основы и территориально общая методика прогнозирования максимальных расходов и гидрографов паводков горных рек	
Джорджевич Н.Т.	149
Прогноз паводка на реках с тало-дождевым питанием	
<u>2. Дискуссия</u>	159
Шимо Э.	163
К проблематике моделей косвенной оценки запаса воды в снежном покрове	
Мухин В.М.	171
Некоторые устойчивые методы решения одной обратной задачи гидрологических прогнозов	
Лыло В.М. Жидкова Л.В.	179
Прогноз гидрографа дождевых паводков рек бассейна Тисы на основе комплексного использования стока малых рек и осадков	
<u>3. Дискуссия</u>	187
Немеч Й.	191
Сравнительные исследования гидрологических прогнозируемых моделей	
Анджелич М.	193
Краткосрочные прогнозы на приточном участке реки Дунай	
Оцоколич М.С.	205
Последовательность декадных расходов на нижнем течении реки Сава и возможность ведения их прогноза	
Подани М.	219
Экономические аспекты гидрологических прогнозов	
<u>4. Дискуссия</u>	231
<u>2. Долгосрочный прогноз уровней и расходов воды</u>	235
Грубер О.	237
Функция расхода воды водосборного бассейна, которая изображает кривые расхода воды с N-годовой обеспеченностью и превышением продолжительности стока	
Сапожников В.И.	253
Долгосрочный прогноз гидрографов больших рек за периоды паводков	
Франке П.Г. Шпигель Р.П.	261
Структурные прогнозы для измененного водохранилищем стока	
Ресль Г.	271
Математическая модель прогнозирования процессов стока на баварском отрезке Дуная после сооружения подпорных ступеней	
<u>5. Дискуссия</u>	285
Прохаска С.	291
Кросскорреляционное исследование зависимости годового стока рек Югославии и характеристик процессов атмосферной циркуляции и солнечной деятельности и разработка методики их сверхдолгосрочного прогнозирования	
Робинзон С.А. Роде Ф.Г.	303
Описание и оценка параметров региональных бассейнов с помощью стохастических моделей прогнозирования в области Дуная	

	Seite
Robinson, S.A. Rohde, F.G.	Beschreibung und Abschätzung regionaler Einzugsparameter mittels stochastischer Vorhersagemodelle im Bereich der Donau 303
Deleur, S.M. Vorozbitov, I.I. Pankratova, E.I.	Verwertung von Satelliteninformationen für Analyse und Vorhersage von Frühjahrshochwässern auf den Flüssen Europas 315
Swanidse, G.G.	Langfristige Abflußprognose für die Beurteilung geplanter Staustufen 325
<u>6. Diskussion</u>	333
<u>3. Vorhersage von niedrigen Wasserständen und Abflüssen (kurz- und langfristig)</u>	337
Klimowa, W.W.	Langfristige Vorhersage minimaler Wasserstände der Donau 339
Meier, R.C.	Langfristige Prognose von Niedrigwasserperioden mit der Zeiteinheit Monat 347
Bonacci, O.	Analyse der Niedrigwasser der Sawa für die Erstellung von Niedrig- wasserprognosen 353
<u>7. Diskussion</u>	363
<u>4. Vorhersage von Eiserscheinungen</u>	365
Generalbericht - Ginzburg	371
Täubert, U.	Ein mathematisches Modell für Prognosen der Vereisung von Flüssen durch Computer-Simulation 379
Csoma, J.	Näherungsweise Bestimmung des Eintritts von Eiserscheinungen auf der Grundlage der Wahrscheinlichkeitsrechnung 395
Zsuffa, I.	Die Vorhersage einiger Elemente des Eisregimes auf der ungarischen Donau 401
<u>8. Diskussion</u>	409
Mita, P.	Vorhersageverfahren für die Bildung bzw. Auflösung einer Eisdecke auf der Unteren Donau in Abhängigkeit von Lufttemperatur und Abfluß 413
Dumitrescu, V.	Langfristige Vorhersage der Eisverhältnisse der Donau 421
Kretschmer, O.	Ober Eisverhältnisse und Winterhochwässer der Donau im Bereich der Großkraftwerke Kachlet bis Ybbs-Persenbeug 429
Jefimowa, S.A. Schanotschkin, S.W.	Vorhersage des Auftretens von Eis auf der Donau 441
Schtscherbak, A.W. Solopenko, L.I.	Das Auftreten von Eisstand auf der Unteren Donau und Möglichkeiten der Vorhersage 447
Aminjewa, W. Balašova, I.V. Ginzburg, B.M. Ponomarev, M.B.	Berechnung und Vorhersage der Eisdicke zum Zwecke einer Verlängerung der Navigationsperiode 455
Bulatow, S.N. Poljakova, K.N. Timčenko, V.M.	Vorhersage der Festigkeitsabnahme des Flußeises und Eisgangs 461
<u>9. Diskussion</u>	467
<u>5. Vorhersage flußmorphologischer Veränderungen</u>	473
Generalbericht - Petschninow	475
Rajnow, S., Ninov, I., Vasilev, S., Pecinov, D.	Einfluß der Staustufe "Eisernes Tor" auf die Schwebstoffführung der Donau 481
Petschninow, D.	Vorhersage über Veränderungen des Flußbettes durch den Bau der Stau- stufe Nikopol-Turnu-Magurele 489
Iwanow, K. Zankov, K.	Vorhersage der Wassergüte an der Donau 495
Scheurmann, K.	Flußmorphologische Veränderungen der Unteren Isar und deren Aus- wirkungen auf die Donau 499
Ahammer, H.	Ergebnisse der Stauraumverlandungen des Inn 505
Michajlow, W.N. Rogow, M.M.	Die zu erwartenden Änderungen des Gewässernetzes und der Wasserfracht im Donaumündungsgebiet 521
<u>10. Diskussion</u>	529
Schlußsitzung	535
Stelczer, K.	Die Donau - Festvortrag 547
Teilnehmer	556

	стр.
Делеур М.С. Ворожбитов И.И. Панкратова Е.И.	Использование спутниковой информации при анализе формирования и прогнозе весеннего половодья на реках Европы 315
Сванидзе Г.Г.	Прогноз условий работы проектируемых гидроузлов в бассейне реки Дунай 325
<u>6. Дискуссия</u>	333
<u>3. Прогноз низких уровней и расходов воды (краткосрочный и долгосрочный)</u>	337
Климова В.В.	Долгосрочный прогноз минимальных уровней Дуная 339
Майер Р.Ц.	Долгосрочные прогнозы периодов межени с единицей измерения 'месяц' 347
Боначи О.	Анализ межени реки Савы с целью его прогноза 353
<u>7. Дискуссия</u>	363
<u>4. Прогноз ледовых явлений</u>	365
Генеральный доклад - Гинзбург	371
Тойберт У.	Математическая модель для прогнозирования замерзания рек при помощи моделирования на ЭВМ 379
Чома Я.	Оценка возникновения ледовых явлений на основе теории вероятностей 395
Жуффа И.	Прогноз об отдельных элементах движения льда на Венгерском участке Дуная 401
<u>8. Дискуссия</u>	409
Мита П.	Метод прогноза образования или оттаивания ледостава на нижнем Дунае в зависимости от температуры воздуха и стока воды 413
Дунитреску В.	Прогноз большой заблаговременности замерзания и вскрытия в Румынском секторе Дуная 421
Кречмер О.	Ледовые условия и зимние паводки Дуная в районе крупных гидростанций от Кахлета до местности Ибс-Персенбойг 429
Ефимова З.А. Шаночкин С.В.	Прогнозы сроков появления льда на Дунае 441
Щербак А.В. Солопенко Л.И.	Условия появления ледостава в низовьях Дуная и методические возможности его прогнозирования 447
Аминева В.Я. Балашова И.В. Гинзбург Б.М. Пономарев М.Б.	Расчеты и прогнозы толщины льда для целей продления навигации 455
Булатов С.Н. Полякова К.Н. Тимченко В.М.	Прогнозы уменьшения прочности и вскрытия рек 461
<u>9. Дискуссия</u>	467
<u>5. Прогноз изменений морфологии речных русел</u>	473
Генеральный доклад - Печинов	475
Райнов Щ. Нинов И. Василев С. Печинов Д.	Влияние гидротехнического комплекса "Железные Ворота" на расход и режим наносов р. Дунай 481
Печинов Д.	Прогноз русловых деформаций в нижнем бьефе гидроузла "Никопол-Турну Магуреле" 489
Иванов К. Цанков К.	Прогнозирование качества воды р. Дунай 495
Шойрманн К.	Морфологические изменения русла нижнего течения реки Изар и их воздействия на Дунай 499
Ахаммер Х.	Результаты обмеления водохранилища на реке Инн 505
Михайлов В.Н. Рогов М.М.	Ожидаемые изменения русловой сети распределения стока воды в устьевой области Дуная 521
<u>10. Дискуссия</u>	529
Заключительное заседание	535
Штельцер К.	Река Дунай - торжественная речь 547
Участники	556

V o r w o r t

In diesem Tagungsbericht sind die Ergebnisse der VIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen dokumentiert. Aufbauend auf den früheren Konferenzen wurde der derzeitige Kenntnisstand in Forschung und Praxis aufgezeichnet, und es ergaben sich auch zahlreiche Anregungen für zukünftige Arbeiten. Dies zeigt sich nicht nur in den Berichten und Konferenzdiskussionen, sondern es kam auch in den vielen Einzelgesprächen der Wissenschaftler am Rande der Konferenz zum Ausdruck. Dieser Gedankenaustausch ist für Forschung und Praxis lebenswichtig.

Für eine konstruktive Zusammenarbeit ist das freundschaftliche Gespräch der Wissenschaftler von großer Bedeutung. Hiervon war auch diese Konferenz gekennzeichnet - nicht zuletzt aufgrund der langjährigen regionalen Zusammenarbeit. Hierfür sei allen Konferenzteilnehmern gedankt.

Auch wenn diese Tagung regional gebunden ist, haben ihre Ergebnisse doch allgemeingültige Bedeutung. So können sie als ein gemeinsamer Beitrag der Donauanlieger-Staaten zum Internationalen Hydrologischen Programm der UNESCO betrachtet werden.

Die in diesem Bericht wiedergegebenen Beiträge entsprechend dem Kenntnisstand von 1975. Die Publikation ist erst jetzt möglich, da die letzten Manuskripte erst 1977 abschließend bearbeitet zur Verfügung standen. Der Redaktionsausschuß war bemüht, die Ergebnisse der Konferenz möglichst vollständig zu veröffentlichen.

Daher wurde auch versucht, die Diskussionen, die manche Anregungen und Erläuterungen enthalten, in die Veröffentlichung aufzunehmen, auch wenn sie nicht ganz vollständig sind.

Es wird um Nachsicht gebeten, wenn die Diskussionstexte, die Schlußsitzung und eine Reihe von Beiträgen sprachliche Eleganz vermissen lassen müssen, denn viele beteiligte Wissenschaftler konnten nicht in ihrer Muttersprache vortragen und diskutieren. Es wurde zwar eine sprachliche und redaktionelle Oberarbeitung vorgenommen, doch wurde sie bewußt auf ein Mindestmaß beschränkt, um die Originalität der Beiträge nicht zu verletzen.

Es sollte nicht unerwähnt bleiben, daß den Generalberichten umfangreiche Unterlagen zugrunde liegen, da die beteiligten Staaten Länderberichte erstellt hatten. Dieses Material kann Interessenten vom Sekretariat des IHP-Nationalkomitees der Bundesrepublik Deutschland zur Verfügung gestellt werden.

Schließlich muß noch ein Wort des Dankes gesagt werden. Das Auswärtige Amt hat durch seine Kulturabteilung die finanzielle Basis gegeben für die Konferenz 1975 und für die Erarbeitung dieses Berichtsbandes; hierfür wird der beste Dank ausgesprochen. Sodann gebührt herzlicher Dank den Mitarbeitern, die an diesem Bericht mitwirkten: B. Nett (formale Gesamtedaktion und deutsche Schreibaarbeiten), A. Weisz (russische Schreibaarbeiten), K. Schuster, H. Neufeld und K. van Ackern (Übersetzung der zweisprachig wiedergegebenen Texte), A. Kaczmar (redaktionelle Hilfen und deutsch/russische Fachterminologie). Diese Damen und Herren haben - zum Teil neben ihrer sonstigen Berufstätigkeit - in intensiver Kleinarbeit das nicht immer besonders heterogene Material zusammengefügt und so an der Gestaltung dieses Berichtes mitgewirkt. Ihre Bemühungen müssen dankend anerkannt werden.

Der Redaktionsausschuß hofft, daß mit diesem Bericht der weitere Gedankenaustausch der Wissenschaftler und Praktiker angeregt und bereichert werden kann.

*L. de Hoop*

Vorsitzender des Redaktionsausschusses

## П р е д и с л о в и е

В этом сборнике докладов документированы результаты VIII конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам. При принятии во внимание предыдущих конференций был обрисован тогдашний уровень знаний в исследовании и на практике, и при этом возникали многочисленные побуждения для будущих работ. Это можно заметить не только в докладах и дискуссиях конференции, это выражалось также и во многочисленных индивидуальных беседах ученых на кайме этой конференции. Такой обмен мнениями является жизненной необходимостью для исследования и практики.

Для конструктивного сотрудничества эти дружеские беседы ученых имеют большое значение. Этим характеризовалась также и эта конференция - и не в последнюю очередь на основе многолетнего регионального сотрудничества. За это следует поблагодарить всех участников конференции.

Несмотря на то, что этот съезд связан регионально, его результаты имеют все же всеобщее значение. Они могут рассматриваться как совместный вклад придунайских государств в международную гидрологическую программу ЮНЕСКО.

Доклады, публикуемые в этом сборнике отражают уровень знаний 1975 года. Их публикация стала возможной лишь теперь, так как последние манускрипты имелись в нашем распоряжении в окончательно обработанном виде лишь в 1977 году. Редакционный комитет направлял усилия на то, чтобы опубликовать результаты конференции как можно полнее.

В связи с этим была сделана попытка включить в эту публикацию те дискуссии, которые содержат некоторые побуждения и пояснения, даже если они и не являются вполне совершенными.

Мы просим о снисхождении, если тексты дискуссий, заключительного заседания и целого ряда докладов не окажутся вполне элегантными в языковом отношении, так как многие из участвовавших ученых не могли докладывать и дискутировать на своем родном языке. Нами была организована языковая и редакционная переработка текстов, однако она сознательно была ограничена на некотором минимуме, чтобы не поранить оригинальность сообщений.

Неотмеченным не должно оставаться и то, что в основе генеральных докладов лежат обширные данные, так как участвовавшие государства представили доклады от имени своих стран. Этот материал может быть передан в распоряжение интересующихся секретариатом национального комитета МГП Федеративной Республики Германии.

В заключение необходимо еще выразить слово благодарности. Министерство иностранных дел, посредством своего отделения культуры, предоставило финансовый базис для проведения конференции в 1975 году и для разработки этого тома докладов; за это выражается сердечнейшая благодарность. Также заслуживается сердечно благодарить сотрудников, принявших участие в подготовке этого сборника к выпуску: Б. Нэтт (формальная общая редакция и немецкие письменные работы), А. Вейсс (русские письменные работы), К. Шустер, Г. Нейфельд и К. ван Аккерн (перевод двуязычно публикуемых текстов), А. Качмар (редакционная помощь и немецкая/русская спецтерминология). Эти дамы и господа, вследствие интенсивной кропотливой работы - частично помимо своих обычных профессиональных занятий - собрали этот не всегда гетерогенный материал воедино и приняли таким образом участие в создании этого издания. Их усилия должны быть признаны с благодарностью.

Редакционный комитет надеется, что это сообщение будет содействовать побуждению и обогащению дальнейших обменов мнениями ученых и практиков.

*U. de Haas*

Председатель редакционного комитета

Eröffnungssitzung der VIII. Konferenz der Donauländer  
über hydrologische Vorhersagen

Dr. U. de Haar - Vorsitzender des Organisationskomitees  
Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V. - Bonn-Bad Godesberg

Sehr verehrte Damen und Herren!

Zu allen Zeiten war es ein Anliegen des Menschen, in die Zukunft, und damit in sein eigenes Schicksal zu sehen. Intuitiven Orakeln und Wahrsagern wurde in gleicher Weise geglaubt, wie sie auch ins Zwielficht und in Unglaubwürdigkeit gerieten.

Doch neben diesen Erscheinungen entwickelte sich schon vor Jahrtausenden die wissenschaftlich begründete Vorhersage. So versuchte man z.B. in Ägypten, die fruchtbringenden Hochwässer des Nils im Voraus zu erkennen. Es war ein erster logischer Ansatz, sich dabei den Sternbildern zuzuwenden, denn aus der Erfahrung heraus kannte man ihre konstante Konstellation in den verschiedenen Jahreszeiten. Dieser Ansatz wurde jedoch in der Kausalität zum Mißverständnis, da man in den Sternen die Ursachen suchte und glaubte, in ihrer Konstellation eine Vorbestimmung des irdischen Geschehens erkennen zu können. Aus einer wissenschaftlichen Betrachtung wurde das zweifelhafte Geschäft von Astrologen.

Heute wenden wir uns wieder den Sternen zu. Kosmonauten erobern den Weltraum, und in diese Entwicklung wird auch die Hoffnung gesetzt, gerade für geowissenschaftliche Zwecke in der Fernerkundung neue Instrumentarien auch für eine Vorhersage zu finden. Hierzu gehört die Vorhersage hydrologischer Vorgänge, denn derartige Kenntnisse sind zunehmend Voraussetzung für eine optimale Bewirtschaftung des begrenzten Rohstoffes Wasser. Dieses Wasser ist eine Basis unserer Existenz.

Analog den Astrologen werden uns heute jedoch auch die Kosmonauten nicht weiterhelfen können, wenn nicht zuvor der allein entscheidende Schritt einer naturwissenschaftlichen Analyse der hydrologischen Prozesse als Basis für eine Extrapolation getan ist, die eine sichere Vorhersage ermöglicht.

Gerade aber an dieser Stelle stehen Sie, die Sie jetzt anläßlich der VIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen erneut zu einem fachlichen Gedankenaustausch zusammengekommen sind. Sie sind auf der Suche danach, wie die natürlichen Vorgänge im gesamten Wasserkreislauf exakt erfaßt und beschrieben werden können und wie die Grundgesetze der Zusammenhänge quantitativ formuliert werden können, um auf dieser Basis eine Technologie für Vorhersagen aufzubauen.

Dies ist ein sehr anspruchsvolles Ziel. Wir sind hier zusammengekommen und wollen einen weiteren Schritt in dieser Richtung tun. So begrüße ich Sie auf das herzlichste zur "VIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen".

Mein Gruß gilt dabei ganz besonders den Delegationen und Wissenschaftlern aus den Staaten, durch welche die uns hier verbindende Donau fließt. Auch wenn die Donau immer wieder Grenzen überschreiten muß, so haben Sie alle dieses natürliche große Gewässersystem doch als Ihr gemeinsames Arbeitsobjekt betrachtet, dessen Bewirtschaftung Ihrer aller Anliegen ist, obwohl es Zielkonflikte geben muß. Ich möchte hoffen, daß wir durch die Ausrichtung der Konferenz erneut einen Beitrag dazu leisten können, im steten Gedankenaustausch, in der sachlichen Kritik und auch in der Festigung der persönlichen und freundschaftlichen Beziehungen der Wissenschaftler untereinander einen weiteren Schritt auf das gemeinsame Ziel tun zu können.

Открытие VIII конференции придунайских стран  
по гидрологическим прогнозам

Докт. У. де Гаар - председатель организационного комитета

Немецкое исследовательское общество (зарег.общ.) - Бонн-Бад Годесберг

Многоуважаемые дамы и господа!

Во все времена человек стремился взглянуть в будущее, а тем самым и в свою собственную судьбу. В интуитивные оракулы и гадания верили в одинаковой степени, как бы они ни попадали в полумрак и недостоверность.

Все же наряду с этими явлениями развивался уже тысячелетия тому назад научно обоснованный прогноз. Так, делались попытки, например, в Египте, познавать наперед плодоносные паводки Нила. Первым логическим придатком при этом было приобщение картин звезд, так как из опыта было известно положение звезд в различные времена года. Это приобщение картин звезд приводило, однако, в казуальности к недоразумению, так как в звездах искалась причина и люди верили в возможность познания предопределимости земных явлений исходя из положения звезд. Из научного наблюдения возникло сомнительное дело астрологов.

Сегодня мы снова обращаемся к звездам. Космонавты овладевают мировым пространством, и в это развитие вселяется надежда, что как раз в будущих разведках с геонаучными целями найдутся новые инструментариумы и для прогнозов. К этому относятся предсказания гидрологических процессов, ибо сведения такого рода являются в возрастающей степени предпосылкой для оптимального хозяйственного использования ограниченного водного сырья. Эта вода является базисом нашего существования.

Аналогично астрологам не смогут нам сегодня помочь также и космонавты, если предварительно не будет сделан, единственно решающий, шаг в направлении научного анализа гидрологических процессов как базис для экстраполяции, которая сделает возможным надежный прогноз.

Однако именно на этом месте стоите вы, собравшись снова для профессионального обмена мнениями по случаю открывающейся сейчас VIII конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Вы находитесь на пути поиска возможностей точного понимания и описания естественного процесса общего круговорота воды, а также возможностей количественной формулировки основных законов взаимосвязей, чтобы построить на этом базисе технологию для прогнозов.

Это очень взыскательная цель. Мы собрались здесь чтобы сделать дальнейший шаг в этом направлении. И так, приветствую вас сердечно к открытию "VIII конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам".

Мой привет особенно относится к делегациям и ученым из тех государств, через которых протекает, связывающий нас здесь, Дунай. И если Дунаю все снова и снова приходится перешагивать границы, то вы все рассматриваете все же эту естественную большую водную систему как свой совместный рабочий объект, хозяйственное использование, которого является вашим общим стремлением, хотя и должны, повидимому, возникнуть целевые конфликты. Я хотел бы надеяться, что мы, выполняя задачи конференции, снова сможем внести вклад к тому, чтобы в непрерывном обмене мнениями, в деловой критике, а также в укреплении личных и дружественных отношений между учеными можно было сделать дальнейший шаг к совместной цели.

Diese regionale Zusammenarbeit in Forschung und wasserwirtschaftlicher Praxis steht jedoch nicht isoliert da. Sie gehört zu den zahlreichen Bemühungen von Hydrologen in der ganzen Welt, durch vertiefte Erkenntnisse die in naher Zukunft zu erwartenden Probleme in der Bewirtschaftung unserer Wasserschätze zu lösen.

Ich freue ich daher, daß auch Internationale Organisationen dieser Arbeit ihre Aufmerksamkeit schenken, und ich begrüße Herrn Bogojavlenskij aus Paris vom Sekretariat für das Internationale Hydrologische Programm, Herrn Nemeč von der Meteorologischen Weltorganisation in Genf sowie Herrn Afanasiev vom Sekretariat der Donaukommission in Budapest.

Die Arbeit unserer Konferenz vollzieht sich nicht etwa in akademischer Abgeschlossenheit, sondern unter der Beteiligung einer aufmerksam interessierten Öffentlichkeit, und ich danke daher den zahlreichen Gästen, die heute zur Eröffnung dieser Tagung gekommen sind.

So begrüße ich Herrn Botschafter Schödel vom Auswärtigen Amt als Vertreter der Regierung der Bundesrepublik Deutschland. Ich möchte Ihnen, Herr Schödel, für das Interesse und die großzügige Unterstützung Ihres Amtes seitens des Organisationskomitees den besten Dank sagen, denn durch diese Hilfe haben Sie uns die sachliche Basis für die Durchführung dieser Konferenz gegeben.

Ich begrüße sodann die Vertreter weiterer zuständiger und interessierter Bundesministerien sowie aus der Bundesverwaltung und danke Ihnen für die durch Ihre Anwesenheit bekundete Aufmerksamkeit.

Mein Gruß gilt weiterhin dem Vertreter des Landes Bayern, Herrn Ministerialdirektor Dr. Süß sowie den Vertretern der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung und des Umweltschutzes. Von Seiten des Landes ist uns auch eine entscheidende Hilfe zur Durchführung der Tagung zuteilgeworden, für die ich herzlichst danke. Im Sinne dieses Dankes begrüße ich besonders den Präsidenten des Landesamtes für Wasserwirtschaft, Herrn Präsidenten Strobel, weiterhin den Präsidenten der Wasser- und Schifffahrtsdirektion in Regensburg, Herrn Präsidenten Pschorr, sowie Herrn Stroinski vom Wasserwirtschaftsamt in Regensburg. Ihnen, meine sehr verehrten Herren, und insbesondere Ihren unermüdlichen Mitarbeitern ist es zu danken, daß die umfangreichen Vorarbeiten für unsere Tagung so konstruktiv durchgeführt werden konnte.

Sodann freue ich mich, auch Herrn Direktor Dr. Rümelin von der Rhein-Main-Donau AG begrüßen zu dürfen, und ich möchte Ihnen ebenfalls für die aktive Unterstützung durch Ihr Unternehmen danken.

Last not least: wir sind zu Gast in einer der bekanntesten Städte des Oberlaufes der Donau, und ich begrüße den Bürgermeister der Stadt Regensburg, Herrn Dr. Pfluger. Ich habe nicht nur Ihnen für die Unterstützung bei der Durchführung dieser Konferenz zu danken, sondern auch den Bürgern dieser Stadt, die uns dabei halfen, daß unsere Gäste Gastfreundschaft fanden und mit guter Erinnerung an Regensburg nach dieser Tagung wieder heimkehren.

Ihnen allen nun, meine Damen und Herren, wünsche ich, daß die Konferenz für Sie von Nutzen ist, daß Sie im Fachgespräch eine Bereicherung für Ihre eigene Arbeit finden, und daß Sie in der persönlichen Begegnung die Freundschaft untereinander vertiefen. Sodann danke ich allen, die mit ihren Beiträgen und Berichten an der Gestaltung dieser Tagung mitwirken.

In dieser Hoffnung eröffne ich die VIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen.

Это региональное сотрудничество в научном исследовании и в практике водного хозяйства нельзя рассматривать изолированно. Оно относится к многочисленным усилиям гидрологов во всем мире разрешить, посредством углубленных научных достижений, ожидаемые в ближайшем будущем проблемы в хозяйственном использовании нашего водного богатства.

Я рад тому, что и интернациональные организации уделяют этой работе свое внимание, и я приветствую господина Богоявленского, прибывшего из Парижа от секретариата Международной Гидрологической Программы, господина Немеца от Всемирной Метеорологической Организации в Женеве, как и господина Афанасьева от секретариата Дунайской комиссии в Будапеште.

Работа нашей конференции протекает не в академической уединенности, а при участии внимательно интересующейся общественности, и я благодарю многочисленных гостей приехавших сегодня к открытию этого съезда.

Я приветствую господина посла Шеделя от министерства иностранных дел как представителя правительства Федеративной Республики Германии. Я хотел бы поблагодарить вас, господин Шедель, от имени организационного комитета за проявленный интерес и за щедрую помощь вашего министерства, так как посредством этой помощи вы обеспечили нас деловым базисом для проведения этой конференции.

Далее я приветствую представителей других компетентных и заинтересованных Федеральных министерств, как и представителей Федеральных управлений и благодарю их за то внимание, которое они проявили своим присутствием.

Мой привет адресуется далее представителю Федеральной земли Бавария, господину министеральному директору докт.Зюссу, как и представителям баварской администрации водного хозяйства и защиты окружающей среды. Со стороны Федеральной земли нам также была выделена значительная помощь для проведения этого съезда, за что я сердечно благодарю. В духе этой благодарности я особенно приветствую президента земельного ведомства по водному хозяйству, господина президента Штробеля, также президента дирекции по водным и судоходным делам в Регенсбурге, господина президента Пшорр, как и господина Штроински от ведомства по водному хозяйству в Регенсбурге. Вам, мои многоуважаемые господа, и особенно вашему неустанному сотрудничеству мы обязаны тому, что обширные подготовительные работы для этого съезда смогли быть проведены так конструктивно.

Далее мне доставляет удовольствие приветствовать и господина директора докт.Рюмелина из акционерного общества Рейн-Майн-Дунай, и я хотел бы вас также поблагодарить за активную поддержку со стороны вашего предприятия.

И так, мы в гостях у одного из известнейших городов верховья Дуная, и я приветствую бургомистра города Регенсбурга, господин докт.Пфлюгера. Я должен благодарить не только вас лично за помощь в деле проведения этой конференции, но также и жителей этого города, которые помогли нам в том, чтобы наши гости нашли здесь гостеприимство и чтобы они вернулись после этого съезда на родину с хорошими воспоминаниями о Регенсбурге.

Всем вам, мои дамы и господа, я желаю, чтобы эта конференция принесла вам пользу, чтобы вы в квалифицированных беседах нашли обогащения для своих собственных работ, и что вы в личных встречах углубили дружбу между собой. Разрешите поблагодарить всех тех, кто содействует оформлению этого съезда своими вкладками и сообщениями.

С этой надеждой я открываю VIII конференцию придунайских стран по гидрологическим прогнозам.

Zum Tode von  
Professor Boris Assenov Marchinkov  
1901 - 1975

Unvorhergesehen muß ich an dieser Stelle das Wort ergreifen. Gestern abend erhielt ich die Nachricht, daß vor wenigen Tagen, am 17. September 1975 einer unserer besten Freunde und Fachkollegen, Herr Professor Dr. ing. Boris Assenov Marchinkov aus Sofia in Bulgarien verstarb.

Professor Marchinkov gilt als der Begründer der hydrologischen Forschung in Bulgarien; er war ein international geschätzter Wissenschaftler.

Geboren am 12. Februar 1901 in Kiyustendzha in Rumänien, studierte er in Sofia und Wien, wo er 1932 sein Ingenieurstudium abschloß. In Bulgarien war er zunächst in der Abteilung Wasserwirtschaft des Landwirtschaftsministeriums tätig und trat 1935 in den neu gegründeten Hydrometrischen Dienst Bulgariens ein, dessen Leiter er später wurde. In dieser Zeit baute er das hydrologische Meßnetz seines Landes auf und regte die ersten hydrologischen Studien an, führte moderne Verfahren der Datenverarbeitung ein und gab die Hydrologischen Jahrbücher heraus.

1946 wurde er zum Professor und Leiter des Instituts für Hydrologie und Hydraulik an der Universität Sofia ernannt. Von den mehr als 30 Veröffentlichungen Marchinkovs seien genannt die Lehrbücher "Hydrologie", "Hydrologie und Hydraulik", "Hydrologie und Flußausbau".

Professor Marchinkov hat sich stets um die internationale Zusammenarbeit bemüht, er war Präsident des Bulgarischen Nationalkomitees für die Internationale Hydrologische Dekade, vertrat sein Land bei vielen internationalen Konferenzen und in internationalen Arbeitsgruppen und förderte auch die Konferenzen der Donauländer über hydrologische Vorhersagen sehr. Die vorangegangene, hervorragend organisierte VII. Konferenz der Donauländer in Varna stand unter seiner Leitung, und er war auch zur Vorbereitung dieser VIII. Konferenz 1975 in München und Regensburg. Er wollte auch in diesen Tagen unter uns sein, aber der Tod kam dem zuvor.

Ich darf Sie bitten, sich zum Gedenken an Herrn Professor Boris Assenov Marchinkov zu erheben.

Alle, die ihn kannten, werden ihn, der ein außergewöhnlich beliebter Wissenschaftler war, ein Mensch, den Güte, Geduld, Freundlichkeit und Aufopferungsbereitschaft auszeichneten, der in seinen freien Stunden der Musik verbunden war und dem die Verständigung unter den Völkern ein Herzensanliegen war, nicht vergessen.

Ich danke Ihnen, daß Sie sich von Ihren Plätzen erhoben haben.

R. Keller

К смерти  
профессора Бориса Ассенова Мархинкова  
1901 - 1975

Непредвиденно я должен здесь взять слово. Вчера вечером я получил известие о том, что несколько дней тому назад, 17-го сентября 1975 года, в Болгарии умер один из наших лучших друзей и коллег профессор доктор инженер Борис Ассенов Мархинков из Софии.

Родился он 12-ого Февраля 1901 года в Кийустендца, в Румынии, был студентом в Софии и Вене, где он в 1932 году закончил свое инженерное образование. В Болгарии он сначала работал в отделении водного хозяйства при министерстве народного хозяйства и в 1935 году поступил на вновь созданную метеорологическую службу Болгарии, которую он позже возглавил. В это время он создал гидрологическую измерительную сеть в своей стране и был организатором первой гидрологической учебы, ввел современные методы обработки данных и выпускал гидрологические ежегодники.

В 1946 году он был назначен профессором и руководителем гидролого-гидравлического института при университете Софии. Из более 30-ти опубликованных трудов Мархинкова я назову учебники: "Гидрология", "Гидрология и гидравлика", "Гидрология и застройка реки".

Профессор Мархинков всегда заботился об интернациональном сотрудничестве, он был президентом болгарского Национального Комитета Международной Гидрологической Декады, представлял свою страну на многих интернациональных конференциях и в интернациональных рабочих группах и очень поддерживал конференцию придунайских стран по гидрологическим прогнозам. блестяще организованная прошлая 7-ая конференция придунайских стран в Варне шла под его руководством, он был в Мюнхене и в Регенсбурге по подготовке этой 8-ой конференции 1975 года. Он хотел быть с нами и в эти дни, но его смерть определила наш съезд.

Я хочу попросить Вас встать в память о господине профессоре Борисе Ассенове Мархинкове.

Все, кто знали его, необыкновенно популярного научного работника, человека, которого выделяли доброта, терпение, приветливость и готовность жертвовать собой, который в свободные часы был связан с музыкой и для которого взаимопонимание между народами было близким к сердцу делом, - его не забудут.

Я благодарю Вас за то, что Вы почтили память вставанием.

Botschafter G. Schödel - Vertreter der Bundesregierung  
 Auswärtiges Amt - Bonn - Stellvertretender Leiter der Abteilung für auswärtige Kulturpolitik

Meine sehr verehrten Damen und Herren!

Es ist mir eine besondere Ehre und Freude, die Vertreter der Nationalkomitees für das Internationale Hydrologische Programm der UNESCO in den acht Ländern von der Quelle der viel besungenen "schönen blauen Donau" bis zum Schwarzen Meer hier an ihrem nördlichsten Punkt in Regensburg namens der Regierung der Bundesrepublik Deutschland willkommen zu heißen.

Ein hochqualifiziertes Gremium europäischer Hydrologen gibt uns das Privileg, die Konferenz über hydrologische Vorhersagen im Donaubereich erstmalig in der Bundesrepublik Deutschland abzuhalten.

Eine der vornehmsten Aufgaben der UNESCO als Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur ist es ja, die internationale Kooperation auf naturwissenschaftlichem Gebiet sowohl weltweit als auch regional zu fördern. Dieser doppelten Aufgabe wird die hier und heute beginnende Konferenz in besonderem Maße gerecht. Ihr Hauptthema betrifft eine der Ressourcen unserer Erde, deren ganze Problematik mehr und mehr in das Bewußtsein der Öffentlichkeit rückt. Als Ziel hat sich diese Konferenz gesetzt, ein wissenschaftlich fundiertes Programm zur Verbesserung des größten internationalsten Flußsystems in Europa zu erarbeiten.

Die Donau war als längster Flußlauf Europas immer schon Objekt sowohl internationaler Verständigungsversuche als auch in der Vergangenheit leider manchmal von internationalen Unstimmigkeiten. Ich darf der Hoffnung Ausdruck geben, daß diese Konferenz, der gleichartige vorausgegangen sind und gleichartige sicherlich folgen werden, einen weiteren Meilenstein des Fortschritts in der friedlichen Zusammenarbeit aller Donau-Anliegerstaaten bilden wird. Je weiter Sie, meine Damen und Herren, vorankommen mit der hier zu erarbeitenden

- Standardisierung der wissenschaftlichen Daten über die hydrologischen Vorhersagen
- der Angleichung der hierfür angewandten wissenschaftlichen Methoden und der
- Vorbereitung der gemeinsamen Abwehr von schädlichen Einflüssen oder möglichen Gefahren für Donau-Anlieger und -Benutzer,

um so eher werden uns in der Zukunft anhaltende Meinungsverschiedenheiten um die Donau und an der Donau erspart bleiben.

In diesem Sinne wünsche ich der Konferenz einen Verlauf, der die in sie gesetzten wissenschaftlichen und völkerverbindenden Erwartungen voll erfüllen mögen.

Посол Г. Шедель

Министерство иностранных дел - Бонн

- Представитель Федерального Правительства
- Заместитель заведующего отделения по делам зарубежной культурной политики

Многоуважаемые дамы и господа!

Для меня это особая честь и радость приветствовать вас от имени правительства Федеративной Республики Германии представителей национальных комитетов Международной Гидрологической Программы ЮНЕСКО в восьми странах - начиная от источника "воспетого прекрасного голубого Дуная" и до Черного моря - здесь в Регенсбурге, ее самом северном пункте.

Высококвалифицированная коллегия европейских гидрологов дала нам привилегию провести конференцию по гидрологическим прогнозам придунайского бассейна впервые в Федеративной Республики Германии.

Одной из важнейших задач ЮНЕСКО, как Организации Объединенных Наций по вопросам образования науки и культуры, является активная, как региональная, так и всемирная поддержка международной кооперации в области естественных наук. Этой двойной задаче воздаст должное начинающаяся здесь сегодня конференция. Ее основная тема касается ресурсов нашей Земли, вся проблематика которой все более и более занимает сознание общественности. Целью этой конференции является разработка научно-обоснованной программы по улучшению самой крупной речной системы Европы.

Дунай, как самая длинная ходовая река Европы, всегда был объектом или международного взаимопонимания, или к сожалению, частых международных разногласий в прошлом. Я могу выразить надежду, что эта конференция, подобные которой ей предшествовали и обязательно последуют, положит еще одну веху на пути прогресса в деле сотрудничества всех придунайских государств. Чем дальше, мои дамы и господа, вы продвинетесь вперед по здесь разрабатываемым

- стандартизации научных данных по гидрологическим прогнозам
- уподобления применяемых для этой цели научных методов и
- организации совместной защиты от вредных влияний или возможных опасностей для владельцев и пользователей Дуная,

тем быстрее в будущем нас минуют длительные разногласия вокруг и около Дуная.

В этом смысле я желаю конференции такой ход, который сможет полностью осуществить доверенные ей научные и народообъединяющие надежды.

Ministerialdirektor Dr. S. Süß

Bayerisches Staatsministerium des Innern - München

Meine sehr verehrten Damen und Herren!

Es ist auch mir eine große Freude, Sie im Auftrag der Bayerischen Staatsregierung hier bei uns in Bayern sehr herzlich begrüßen und willkommen zu heißen. Ich tue das auch im Namen des Bayerischen Staatsministers des Innern, des Herrn Staatsministers Dr. Merk, der es bedauert, heute hier nicht persönlich anwesend sein zu können. Er ist aber aus terminlichen Gründen leider verhindert, an Ihrer Veranstaltung teilzunehmen, und er hat mich gebeten, ihn hier zu vertreten. Wir freuen uns, meine sehr verehrten Damen und Herren, daß die diesjährige Konferenz, die VIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen, in der schönen und traditionsreichen Donaustadt Regensburg stattfindet. Vielleicht gibt Ihnen Ihr Aufenthalt hier Gelegenheit, nicht nur die Schönheiten dieser Stadt mit ihrer alten Geschichte kennenzulernen, sondern auch ihre heutigen Realitäten, insbesondere ihre wirtschaftlichen, ihre kulturellen und auch ihre sozialen Probleme. Ein Einblick in das Leben und Wachsen gerade dieser Donaustadt dürfte Ihren spezifischen Fachproblemen durchaus förderlich sein. Sie alle, meine sehr verehrten Damen und Herren, wissen, daß die Donau, die bekanntlich durch 8 Länder fließt, die wichtigste Lebensader Südost-Europas ist. Sie alle wissen auch, und daran wollte mein kurzer Hinweis erinnern, daß Wasser keine Grenzen kennt. Ich halte es daher für eine der positivsten Erscheinungen der letzten Jahre, daß, lassen Sie mich das in Paraphrase sagen - wenigstens in Wissenschaft, Kultur und Forschung -, die politischen Grenzen mehr und mehr überwunden werden und die internationale Zusammenarbeit, der Austausch von Erfahrungen und das gegenseitige Verständnis im Vordergrund stehen. Ausdruck dieses Gemeinschaftsgeistes sind auch die Aktivitäten der UNESCO, die auf dem Gebiete der Wasserwirtschaft und Gewässerkunde darauf abzielen, internationale Kontakte herzustellen, die Kooperation zwischen Wissenschaft und Praxis zu fördern und großräumige, zum Teil globale Forschungsprojekte einzuleiten. Daß Sie sich heute aus allen Donauanliegerstaaten hier zusammengefunden haben, um in der Hydrologie des Donauraumes zusammen zu arbeiten, ist ein Resultat dieser - wie ich meine verdienstvollen - Impulse der UNESCO. Die aus alter Tradition bestehende bilaterale und - bei der Donauschifffahrt - auch multilaterale wasserwirtschaftliche Zusammenarbeit an der Donau wird damit enger und intensiver.

Meine Damen und Herren, Sie haben für Ihre diesjährige Konferenz eine Stadt im oberen Einzugsgebiet der Donau ausgewählt. Wir befinden uns hier, es wurde bereits angedeutet, am nördlichsten Punkt des ganzen Donaulaufs, 2 400 km von der Donaumündung entfernt; die Donau hat hier in Regensburg erst 4 % ihres Gesamt-Einzugsgebietes durchflossen. Dennoch ist das Donautal auch in Bayern einer der bedeutendsten Entwicklungsachsen, und wir sind deswegen sehr sorgfältig darauf bedacht, den Strom auch in der Zukunft für diese Funktion geeignet zu erhalten. Mit großem Interesse verfolgen wir Ihre wissenschaftlich-methodischen Arbeiten insbesondere über Hochwasser- und Niedrigwasservorhersagen und über die mathematischen Modelle, weil wir uns davon eine bessere Kenntnis der hydrologischen Vorgänge an der Donau und ein verfeinertes Rüstzeug für die praktische wasserwirtschaftliche Arbeit erhoffen. Dabei sind wir uns aber völlig klar darüber, daß selbst bei Anwendung modernster Methoden der Mathematisierung, Simulation und Prognose manche Unsicherheit bestehen bleibt. Die Vorgänge des Wasserhaushalts sind eben zu komplex, die Gesetzmäßigkeiten von Naturereignissen nie bis in letzte zahlenmäßig zu erfassen. Wie auf anderen Gebieten hat auch hier die Natur dafür gesorgt, daß unsere Bäume nicht in den Himmel wachsen.

Aus gutem Grund scheint mir in Ihrem Arbeitsprogramm besonderes Gewicht auf der Weiterentwicklung der Hochwasservorhersage zu liegen. Immer wieder - so auch wiederholt in diesem Jahr - wird die Bevölkerung in den Flußtäälern und Niederungen des Donaugebietes von verheerenden Hochwässern heimgesucht. Gewaltig sind die Schäden, die dadurch entstehen können, und groß sind die Opfer, die den Menschen dadurch auferlegt werden. In solchen Fällen ist wirksamer Schutz und rasche Hilfe dringend notwendig. In allen Donauländern ist es daher eine der vordringlichsten Aufgaben, die Menschen möglichst frühzeitig über den zeitlichen Ablauf der Hochwasserwelle und den Umfang der zu erwartenden Überflutungen zu informieren, damit sie sich rechtzeitig

Министериальный директор доктор Эвсс

Баварское государственное министерство внутренних дел - Мюнхен

Многоуважаемые дамы и господа!

И для меня большая радость по поручению баварского государственного правительства сердечно приветствовать Вас здесь у нас в Баварии. Это я делаю и от имени Баварского государственного министерства внутренних дел, господина государственного министра доктора Мерка, который сожалеет о том, что не может сегодня здесь лично присутствовать. Но из-за срочных дел он не имеет возможности принимать участие в вашем мероприятии, и по этой причине он попросил меня его здесь заместить. Мы рады, мои многоуважаемые дамы и господа, что конференция текущего года, 8-ая конференция придунайских стран по гидрологическим прогнозам, проходит в красивом и богатом традициями городе Регенсбурге. Может ваше пребывание здесь дать возможность познакомиться не только с красотами города и с его старой историей, но и с его настоящей реальностью, в особенности с его хозяйственными, культурными и социальными проблемами. Ознакомление с жизнью и ростом именно этого придунайского города непременно должно быть полезным вашим специфическим предметным проблемам. Все вы, многоуважаемые дамы и господа, знаете, что Дунай, который, как известно, протекает через 8 стран, является важнейшей артерией жизни для юго-востока Европы. И все вы знаете, о чем я все же хотел коротко напомнить, что вода не знает границ. Поэтому я считаю одним из положительнейших явлений последних лет то, разрешите мне это отметить в скобках, что по меньшей мере в науке, культуре и исследованиях, что политические границы все более и более преодолеваются и интернациональное сотрудничество, обмен и взаимное понимание стоят на переднем плане. Выражением этого духа солидарности и является активная деятельность ЮНЕСКО, которая в области водного хозяйства и гидрологии нацеливается на установление интернациональных контактов, на поддержание кооперации науки и техники и на развертывание объемных, частично глобальных исследовательских проектов. То, что вы сегодня здесь собрались из всех придунайских стран с целью совместной работы в гидрологии района Дуная, есть результат этих, я считаю заслуженных, импульсов ЮНЕСКО. С давних времен имевшее место двустороннее - а для дунайского пароходства - многостороннее сотрудничество в придунайском водном хозяйстве, становится тем самым теснее и интенсивнее.

Мои дамы и господа, для нынешней конференции вы выбрали город в верхнем географическом районе реки Дуная. Мы находимся здесь, как уже было отмечено, в севернейшем пункте течения Дуная, на расстоянии 2400 км от его устья; до города Регенсбург Дунай проходит всего лишь 4% своей общей географической длины. Тем не менее долина Дуная в Баварии является одним из основных стержней развития и поэтому мы проявляем тщательную заботу о том, чтобы и в будущем использовать реку в этой функции. С большим интересом мы следили за вашими научно-методическими работами, в особенности по прогнозу паводков и межени и по математическому моделированию, так как мы надеемся получить улучшенные знания в области гидрологических процессов при Дунае и более современное оружие для практической работы в водном хозяйстве. При этом мы ясно понимаем, что даже при применении новейших методов математизации, симуляции и прогнозирования всегда еще есть место частым неуверенностям. Процессы в водном хозяйстве слишком сложны, чтобы охватить количественно все до последней закономерности явлений природы. Как и в других областях природа и здесь позаботилась о том, чтобы наши деревья не вращались в небо.

Из добрых намерений, как мне кажется, в вашей рабочей программе особое внимание уделяется дальнейшему развитию прогнозирования паводков. Все снова - в этом году даже дважды - население в долинах реки и низменностях придунайских районов испытывает разрушительное действие паводков. Велик ущерб, который может быть ими вызван, и велики жертвы, которые

in Sicherheit bringen können. In solchen Zeiten bewährt sich die gute wasserwirtschaftliche Partnerschaft und zwar über alle Ländergrenzen hinweg. Ich meine, daß Ihre Arbeit und die persönlichen Kontakte zwischen den Wissenschaftlern und den Wasserwirtschaftlern des Donauraumes wesentlich dazu beitragen können, die Hochwassernot zu lindern.

Meine sehr verehrten Damen und Herren, ich deutete es zu Anfang schon an, Sie sollten während Ihrer Konferenztage auch Regensburg mit seinen Meisterwerken alter Städte- und Ingenieurbaukunst kennen lernen. Ohne dem Herrn Bürgermeister vorgreifen zu wollen, möchte ich doch einige markante Stationen aus der Geschichte dieser Stadt nennen. Zuerst Keltensiedlung - Römerfestung - Bajuwarenhauptstadt, dann mittelalterliche Donaustadt - Handelszentrale - Freie Reichstadt und heute aufstrebende Industriestadt - Verkehrszentrum und moderne Universitätstadt. Mit diesen wenigen Stationen aus 2 Jahrtausenden möchte ich die Ausstrahlung dieser Stadt auf die europäische, deutsche und bayerische Geschichte andeuten. Seit alten Zeiten Treffpunkt der Kulturen des Südens, Westens und Ostens ist Regensburg wohl der rechte Ort für diese Konferenz der Donauländer.

Aus Ihrem Programm, meine sehr verehrten Damen und Herren, konnte ich entnehmen, daß Sie auch eine Exkursion durchführen werden, die Sie über Kloster Weltenburg, Landshut und München bis Oberammergau führen wird. Wir freuen uns darüber, daß Ihnen in dieser Fahrt Gelegenheit gegeben wird, auch einen Eindruck von Land und Leuten zu bekommen. Sie werden auf dieser Fahrt, hoffentlich bei schönem Wetter, durch viele Dörfer und Städte unseres Landes kommen und dabei eine reizvolle und abwechslungsreiche Landschaft und viele herrliche Kunstdenkmäler erleben. Ich hoffe und wünsche sehr, daß Ihnen diese Fahrt neben vielen fachlichen Erkenntnissen auch einen guten und einen bleibenden Eindruck von Land und Leuten vermitteln wird, und daß Sie unser Land in guter Erinnerung behalten werden.

Abschließend darf ich Ihnen einen harmonischen Verlauf Ihrer Zusammenkunft und der anschließenden Studienreise wünschen. Ich hoffe, daß Sie sich bei uns in Bayern wohlfühlen, daß Sie auf Ihrer Tagung neue Erkenntnisse und Erfahrungen gewinnen werden und daß sich - last not least - die menschlichen und kollegialen Beziehungen dabei festigen. Ich danke Ihnen.

Bürgermeister Dr. K. Pfluger

Stadt Regensburg

Meine werten Gäste, sehr verehrte Damen und Herren!

Namens der Stadt Regensburg, namens des Stadtrates und der gesamten Bürgerschaft entbiete ich der VIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen und allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern den herzlichsten Willkommensgruß der Stadt Regensburg und überbringe auch die besten Wünsche für Ihre gesamte Tagung. Wir freuen uns besonders, in Regensburg eine internationale Tagung zu haben und Gäste aus dem Ausland willkommen zu heißen.

Regensburg, das wurde von den Vertretern des Landes Bayern dankenswerterweise schon ausgeführt, so daß es der Hausherr hier nicht mehr zu tun braucht, ist in seiner großen Geschichte immer sehr mit den Ländern des Ostens und des Südostens verbunden gewesen. Vielleicht zeigt gerade der Donaustrom nach dem Südosten, und wir freuen uns daher, diese Gäste in unserer alten Stadt zu begrüßen wie vor kurzem auch die Limnologen, die sich in einer internationalen Arbeitsgemeinschaft hier in Regensburg zusammengefunden haben. Wenn ich von der guten Partnerschaft mit den Völkern des Südostraumes spreche, mit den Donauanliegern, dann darf ich darauf hinweisen, daß Regensburg auch in anderer Hinsicht die Grenzen überschreitet, weil wir in den letzten Jahren fast mit allen Donauanliegerstaaten Kulturtage in Regensburg veranstaltet haben, so daß man sagen kann, daß hier eine Kooperation im Bereich der Kultur und auf vielen anderen Gebieten stattgefunden hat.

по этой причине накладываются на людей. В таких случаях срочно необходимы эффективная защита и срочная помощь. По этой причине первостепенной задачей для всех придунайских стран является как можно раньше информировать людей о времени наступления половодья и ожидаемой мере затопления, с той целью, чтобы они своевременно могли перебраться в безопасное место. В такие времена доброе сотрудничество в водном хозяйстве оправдывает надежды и притом не зная межгосударственных границ. Я думаю, что ваша работа и личные контакты между научными сотрудниками и гидротехниками дунайского бассейна внесут существенный вклад в дело облегчения бедствий, вызываемых паводками.

Многоуважаемые дамы и господа! Я уже вначале отметил, что во время вашей конференции вы должны еще познакомиться и с Регенсбургом, с его шедеврами искусства старых городов и инженерного строительства. Не имея желания опередить господина бургомистра, я все-таки хотел бы назвать несколько примечательных мест из истории этого города. Сначала селение кельтов - римская крепость - столица бавваров, затем средневековый придунайский город - торговый центр - свободный имперский город, а сегодня стремительный индустриальный город - транспортный центр и современный университетский город. Этими немногими пунктами из двух тысячелетий я бы хотел указать на влияние этого города на европейскую, немецкую и баварскую истории. С давних времен, являясь местом встреч культур юга, запада и востока, Регенсбург является, пожалуй, правильным местом для этой конференции придунайских стран.

Из вашей программы, многоуважаемые дамы и господа, я могу сделать вывод, что вы проведете еще экскурсию, которая пройдет через Велтенбургский монастырь, Ландсхут и Мюнхен до Обераммергау. Мы рады тому, что в этой поездке вам будет дана возможность получить еще и впечатление о стране и людях. Во время этой поездки, надеемся при хорошей погоде, вы проедете многие села и города нашей страны и при этом увидите привлекательный и разнообразный ландшафт и многие великолепные памятники искусства. Я надеюсь и от души желаю, чтобы эта поездка помимо многих познаний по специальности оставила бы еще доброе и неизгладимое впечатление о стране и людях, и чтобы наша страна вызвала у вас хорошие воспоминания.

В заключение я хочу пожелать Вам гармонического хода вашей встречи и заключительной учебной поездки. Я надеюсь, что Вы себя у нас в Баварии хорошо чувствуете, что на своем съезде Вы приобретете новые знания и опыт, и что человеческие и коллегиальные отношения при этом укрепятся. Благодарю Вас за внимание.

Бургомистр доктор К. Флюгер

Город Регенсбург

Мои дорогие гости, многоуважаемые дамы и господа!

От имени города Регенсбурга, от имени городского Совета и всего населения я передаю 8-ой конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам и всем участницам и участникам сердечнейшее добро пожаловать в город Регенсбург и передаю еще самые лучшие пожелания вашему съезду в общем. Мы особенно рады тому, что в Регенсбурге имеет место интернациональный съезд и рады приветствовать гостей из-за рубежа.

Регенсбург - как уже достойным образом было сказано представителями земли Баварии, и хозяину дома уже нечего сказать - в своей длинной истории всегда был тесно связан со странами востока и юго-востока. Может быть как раз течение Дуная показывает на юго-восток, и мы рады поэтому приветствовать этих гостей в нашем старом городе, как недавно мы здесь

Ich darf noch kurz darauf hinweisen, daß Regensburg als bedeutende Stadt der Vergangenheit mit einer großen Geschichte auch in der jetzigen Zeit außer der Erhaltung dieser alten Struktur dieser mittelalterlichen Stadt noch besondere Aufgaben hat, die gerade auch mit Ihren Problemen zusammenhängen, nämlich mit dem Strom. So schön es ist, an einem Strom zu liegen, so schwer ist es aber auch, die Probleme zu meistern. Wenn ich aus Ihrem breitgefächertem Spektrum der Veranstaltungen alle möglichen Untersuchungen ersehe, dann möchte ich wünschen, daß diese wissenschaftlichen Arbeiten auch für die Praxis Erfolge bringen, die gerade für uns an der Donau sehr wichtig sind. Wir haben die Probleme des Brückenbaues, der Hochwasserfreilegung und auch das Problem des Kraftwerkbaues. Wir hoffen und wünschen, daß uns das, was Sie hier erarbeiten, Hilfestellung bringen wird.

Von Regensburg aus wird nun die letzte Strecke des Rhein-Main-Donau-Kanals geschlossen, einer Schiffahrtsstraße, die, weil sie durch ganz Europa geht, Europa-Kanal genannt wird. Regensburg freut sich, an diesem Europa-Kanal zu liegen und damit beitragen zu können für die Verständigung aller Völker in Europa. Wir sind bestrebt, das, was uns in der Geschichte gezeigt worden ist, in der heutigen Zeit zu verwirklichen, eine friedliche Zusammenarbeit mit allen Völkern.

So wünsche ich Ihrer Konferenz in Regensburg einen erfolgreichen und schönen Verlauf. Ich wünsche aber auch allen Teilnehmern, daß Sie Regensburg kennenlernen, daß Sie etwas von der Atmosphäre dieser alten Stadt mitnehmen und daß Sie selbst gerne wieder nach Regensburg zurückkehren. Alles Gute und schönen Aufenthalt in Regensburg.

J. N. Bogojavlenskij

UNESCO - Paris

Sehr verehrte Damen und Herren,

erlauben Sie mir, Sie im Namen des UNESCO-Sekretariates zu begrüßen und allen Teilnehmern der VIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen eine erfolgreiche Arbeit zu wünschen. Gestatten Sie mir, Ihnen kurz über die Tätigkeit der UNESCO auf dem Gebiete der Weltwasservorräte zu berichten. Die 17. Sitzung der Generalkonferenz der UNESCO hat, beginnend mit dem Jahre 1975, die Durchführung des ersten Internationalen Hydrologischen Programms als Fortsetzung der Internationalen Hydrologischen Dekade beschlossen. Die 18. Sitzung der Generalkonferenz hat den Arbeitsplan des Internationalen Hydrologischen Programms für die Zeit von 1975-80 angenommen, und die 1. Konferenz des Zwischenstaatlichen Rates fand im April in Paris statt. Der Zwischenstaatliche Rat hat das Programm für die nächsten 2 Jahre angenommen. Im Rahmen der hydrologischen Untersuchungen hat der Rat beschlossen, alle Kräfte auf die Durchführung der acht Hauptprojekte zu konzentrieren, die in den Arbeitsplan 1975-80 aufgenommen wurden. Es handelt sich um folgende Projekte:

- Verbesserung der Methode der Wasserbilanzberechnung einschließlich des Grundwassers,
- Erstellung von regionalen, kontinentalen und globalen Bilanzen,
- Untersuchung des hydrologischen Regimes und Aufstellung von mathematischen Methoden für die wasserwirtschaftliche Planung, selbst bei unzureichenden Angaben,
- Erweiterung der Untersuchungen in Repräsentativ- und Versuchsgebieten,
- Untersuchungen hydrologischer und ökonomischer Auswirkungen der Tätigkeit des Menschen und ihr Ausmaß,
- hydrologische und ökonomische Aspekte der Wasserverunreinigung,
- Einfluß der Urbanisierung auf die Qualität des Wassers,
- langfristige Vorhersagen des Grundwasserregimes unter Berücksichtigung der Tätigkeit des Menschen.

Für eine erfolgreiche Durchführung der aufgezählten Projekte hat der Rat 17 Arbeitsgruppen zur Durchführung der einzelnen Projekte des Programms und eine Reihe von Berichterstatern zur Vorbereitung der wissenschaftlichen Untersuchungen für die gewählten Themen ernannt. Der Rat hat zwei Komitees gegründet, eines für die

приветствовали лимнологов, которые собрались здесь в Регенсбурге в интернациональное содружество. Когда я говорю о хорошем сотрудничестве с народами юговосточного района, с придунайцами, я могу указать на то, что Регенсбург и в других отношениях перешагивает границы, так как мы в последние годы почти со всеми придунайскими государствами провели дни культуры в Регенсбурге, так что можно сказать, здесь нашла место кооперация в области культуры и во многих других областях. Я еще коротко хочу указать на то, что Регенсбург, как важный город прошлого с богатой историей, и в настоящее время, кроме функций по сохранению старой структуры этого средневекового города, имеет особые задачи, которые как раз связаны и с вашими проблемами, а именно с водой. Хорошо жить около воды, но в такой же степени и трудно преодолевать проблемы. Когда я из вашего широкого спектра тем мероприятий усматриваю всевозможные научные исследования, то я хотел бы пожелать, чтобы эти научные работы и для практики принесли бы успех, который как раз очень важен для нас придунайцев. У нас имеются проблемы в деле строительства мостов, управления паводками, а также и в деле строительства гидроэлектростанций.

С городом Регенсбургом связано окончание строительства последнего отрезка канала Рейн-Майн-Дунай, судоходной линии, которая будет называться европейским каналом, так как она проходит через всю Европу. Регенсбург рад тому, что он будет лежать на этом канале и тем самым делать вклад в дело взаимопонимания народов в Европе. Мы стремимся в настоящее время осуществлять то, чему нас научила история - мирному сотрудничеству всех народов.

Итак, я желаю успешного хода вашей конференции в Регенсбурге. И еще я желаю, чтобы все участники конференции познакомились с Регенсбургом, чтобы вы кое-что взяли с собой из атмосферы этого старого города и чтобы вы сами с удовольствием вернулись бы снова в Регенсбург. Всего Вам наилучшего и хорошего пребывания в Регенсбурге.

Й.Н. Богоявленский

ЮНЕСКО - Париж

Глубокоуважаемые дамы и господа,

разрешите мне от имени секретариата ЮНЕСКО приветствовать вас и пожелать успешные работы всем участникам 8-ой конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Разрешите коротко рассказать вам о деятельности ЮНЕСКО в области изучения водных ресурсов мира. Семнадцатая сессия Генеральной Конференции ЮНЕСКО приняла решение о проведении начиная с 1975-го года Первой Международной Гидрологической Программы, которая явилась продолжением программы Международного Гидрологического Десятилетия. Восемнадцатая сессия Генеральной Конференции приняла рабочий план Международной Гидрологической Программы на период 1975-80-ие годы и первая конференция Межправительственного Совета состоялась в Париже в апреле месяце. Межправительственный Совет принял программу на последующие два года. В области гидрологических исследований совет решил сконцентрировать усилия на выполнение восьми главных научных проектов, которые включены в план работ на 75-80-ие годы. Это следующие проекты:

- развитие усовершенствования методики расчета водных балансов включая подземные воды,
- составление региональных, континентальных и глобальных водных балансов,
- исследование гидрологического режима и разработка методов расчетных элементов для водохозяйственного проектирования, в том числе при недостаточности данных,

Untersuchung des Einflusses der Tätigkeit des Menschen auf das hydrologische Regime und ein zweites für die Ausbildung von Nachwuchskräften und die Bereitstellung technischer Hilfe. Wie früher lenkt das Programm seine Hauptaufmerksamkeit auf die Entwicklung der regionalen Zusammenarbeit der Länder. So wird speziell im September 1976 in Bulgarien ein Seminar der Europäischen Länder für Methoden zur Berechnung der Wasserbilanz Europas durchgeführt, und im Jahre 1977 wird in Brüssel die 2. Europäische Sitzung für hydrologische Probleme durchgeführt. Ihre Zusammenarbeit ist ein gutes Beispiel für die regionale Zusammenarbeit der Länder im Einzugsgebiet der Donau. Das Sekretariat des Internationalen Hydrologischen Programms beabsichtigt, eine Reihe von Unterlagen zu veröffentlichen, die für Wissenschaftler, die sich mit Fragen der Hydrologie befassen, von Interesse sind. So wird im Jahre 1975 ein Katalog über die größten Hochwässer der Welt veröffentlicht. Im Jahre 1976 erscheint ein casebook zur Vereinheitlichung der Hochwasserberechnung; es wird eine Reihe von Unterlagen über die Untersuchungen auf Repräsentativ- und Versuchsgebiete und über Grundwasseruntersuchungen herausgegeben. Veröffentlicht werden Abflußwerte ausgewählter Flüsse der Erde und eine Reihe anderer Unterlagen.

In dieser Zeit wird eine Reihe von internationalen Symposien über aktuelle Themen der Gegenwart durchgeführt. Im Jahre 1976 wird in Stockholm das Seminar für sozio-ökonomische Aspekte der urbanen Hydrologie durchgeführt, im Jahre 1977 wird ein Symposium über Erosion und Sedimentation und in Amsterdam 1977 das Symposium und Seminar über Probleme der urbanen Hydrologie durchgeführt.

Erlauben Sie mir zum Schluß noch einmal, Ihnen eine gute, erfolgreiche Arbeit hier in diesem schönen Saal zu wünschen. Danke für Ihre Aufmerksamkeit.

Professor J. Némec

Meteorologische Weltorganisation (WMO) - Genf

Werte Damen und Herren,

unsere Organisation ist, wie Ihnen vielleicht bekannt ist, auch auf dem Gebiet der Hydrologie tätig. Der 7. Kongreß der WMO, im Mai dieses Jahres in Genf zusammengetroffen, hat die Konvention, d.h., das Grunddokument der Organisation, abgeändert und die Hydrologie den prioritätischen Tätigkeitsbereichen unserer Organisation hinzugefügt. Dieses bedeutet aber nicht, daß die WMO in der Hydrologie ein Neuling ist, denn wir haben uns seit vielen Jahren mit hydrologischen Problemen befaßt, insbesondere mit den hydrologischen Problemen, die etwas mit der Meteorologie zu tun haben - und bekanntlich haben die meisten hydrologischen Probleme etwas mit Meteorologie zu tun! Insbesondere haben wir uns mit hydrometeorologischen Vorhersagen befaßt, d.h. mit hydrologischen Vorhersagen, in die, um einen größeren Zeitvorsprung zu gewinnen, auch meteorologische Vorhersagen eingehen. Auf diesem Gebiet haben wir in diesem Jahr ein wichtiges Projekt zur vergleichenden Untersuchung der Vorhersagemodelle abgeschlossen. Im Rahmen dieses Projektes haben wir zehn verschiedene mathematische Modelle anhand beobachteter Daten aus sechs auf der ganzen Welt verstreuten Einzugsgebiete verglichen. Mehrere Referate in dieser Tagung hängen eng mit unserer Arbeit in der WMO zusammen, z.B. die Verwendung von Satellitendaten für Vorhersagen. Es handelt sich hier meistens um meteorologische Satelliten, die dem weltumfassenden Datenaustauschsystem der WMO angeschlossen sind.

Natürlich haben wir auch die Zusammenarbeit der Donaustaaten mit größtem Interesse verfolgt. Die WMO war an allen vorhergehenden Tagungen vertreten, und es freut mich sehr, daß ich an dieser VIII. Tagung anwesend sein kann. Meine Damen und Herren, ich wünsche Ihnen an Ihrer Tagung viel Erfolg! Danke vielmals.

- развитие исследований на репрезентативных и экспериментальных бассейнах,
- исследования гидрологических и экономических последствий деятельности человека и их оценка,
- гидрологические и экономические аспекты загрязнения вод,
- влияние урбанизации на гидрологические режимы качества воды,
- долгосрочные прогнозирование режима подземных вод с учетом деятельности человека.

Для успешного выполнения перечисленных проектов совет организовал семнадцать рабочих групп для выполнения отдельных проектов программы, а также назначал ряд докладчиков для подготовки научных обзоров по избранным темам. Совет организовал два комитета, один по вопросам изучения влияния деятельности человека на гидрологический режим и второй по образованию и подготовке кадров и технической помощи. Как раньше программа уделяет большое внимание развитию регионального сотрудничества стран. Так в частности в 1976-ом году в сентябре в Болгарии будет проведен семинар Европейских стран по методам расчета водного баланса Европы. А в 77-ом году в Брюсселе будет проведено II-ое Европейское совещание по вопросам гидрологии. Ваше сотрудничество является хорошим примером регионального сотрудничества стран дунайского бассейна. Секретариат Международной Гидрологической Программы намерен опубликовать ряд материалов, который несомненно будет представлять интерес для ученых, занимающихся вопросами в области гидрологии. Так в 75-ом году будет опубликован каталог больших паводков мира. В 76-ом году будет опубликован casebook по обобщению мирового опыта по расчету паводков, будет опубликован ряд материалов, касающихся исследования на репрезентативных и экспериментальных бассейнах и исследования подземных вод, будут опубликованы расходы избранных рек мира и ряд других материалов.

В этот период будет проведен ряд международных симпозиумов на самые актуальные темы современности. В 77-ом году будет проведен симпозиум по эрозии и седиментации, в 76-ом году в Стокгольме будет проведен семинар по социально-экономическим вопросам городской гидрологии, в 77-ом году в Амстердаме будет проведен симпозиум и семинар по вопросам гидрологии городов. Разрешите мне в заключении еще раз пожелать вам большой хорошей работы, успешной работы здесь в этом прекрасном зале. Спасибо за внимание.

Профессор Й. Нэмец

Всемирная Метеорологическая Организация (ВМО) - Женева

Уважаемые дамы и господа,

наша организация, как вам наверно известно, тоже занимается проблемами в области гидрологии. Седьмой конгресс ВМО, собравшийся в мае этого года в Женеве, отменил конвенцию, т.е. основной документ организации, и дополнил гидрологией ведущую сферу деятельности нашей организации. Но это не значит, что ВМО является новичком в гидрологии, ведь мы на протяжении многих лет занимались проблемами гидрологии, в особенности с теми гидрологическими проблемами, которые в какой-то степени связаны с метеорологией - а как известно, все гидрологические проблемы в какой-то степени связаны с метеорологией! В особенности мы занимались гидрометеорологическими прогнозами, т.е. гидрологическими прогнозами, в которые с целью получения преимущества во времени, включается и метеорологические прогнозы. В этой области мы завершили в этом году важный проект для сравнительного исследования моделей прогноза. В рамках данного проекта мы сравнили десять разных математических моделей на основе данных наблюдений в шести, разбросанных по всему миру, речных бассейнах.

A. J. Afanasiev

Donaukommission - Budapest

Sehr geehrte Kollegen, liebe Freunde,

erlauben Sie mir, Sie im Namen des Sekretariats der Donaukommission zu begrüßen und Ihnen viel Erfolg bei der Arbeit zu wünschen. Die Arbeit dieser Konferenz ist vom Standpunkt der an die Donaukommission gestellten Aufgaben von großem Interesse. Die Koordinierung des hydrometeorologischen Dienstes an der Donau, der (qualitativ) gute Betrieb der Donauschiffahrt ist ohne hydrologische Vorhersagen nicht möglich, und ich füge hinzu, ohne alle die hydrologischen Vorhersagen, die im Programm dieser Konferenz enthalten sind. Die Donaukommission befaßt sich mit verschiedenen Aspekten dieses Problems: mit der Bewertung von Vorhersagen der für die Ausarbeitung entsprechender Methoden erforderlichen Werte und der Prüfung verschiedener Methoden der hydrologischen Vorhersage. Alle diese Fragen sind systematisch in der Tagesordnung der ordentlichen Sitzungen der Donaukommission enthalten. Das jüngste Beispiel der 33. Sitzung der Donaukommission unterstreicht die Notwendigkeit einer verstärkten Arbeit zur Verbesserung der Methoden langfristiger Wasserstandsvorhersagen. Das Interesse der Donaukommission an der Konferenz ist eher eine rein akademische Frage. Vieles, was in den vorangegangenen Konferenzen gehört wurde, wird in der operativen Praxis der Donauländer zur Verbesserung des Betriebes der Donauschiffahrt angewendet. Es ist bekannt, daß die Kommission eine Arbeitsgruppe für Hydrologie der Donau geschaffen hat, deren Programm auf hydrologische Vorhersagen großen Wert legt. Und auch weiterhin wird die Donaukommission die Ergebnisse künftiger Konferenzen bei der Verbesserung der Methoden des hydrometeorologischen Dienstes anwenden. Zum Schluß möchte ich die unbestreitbare Tatsache erwähnen, daß wir Hydrologen auf dem Hintergrund dieser Konferenzen, die jetzt schon alte Tradition geworden sind, enge Freundschaft geschlossen haben, und sicher wird diese Freundschaft auch weiterhin wachsen und sich festigen. Es ist schmerzlich, daß wir einen guten Freund und großen Wissenschaftler, Professor Marčinkov, der viel zur Festigung unserer Zusammenarbeit beigetragen hat, verloren haben.

Erlauben Sie mir noch einmal, Ihnen viel Erfolg für die Arbeit unserer Konferenz und allen eine gute Gesundheit und eine unermüdlige Kraft bei der Verbesserung hydrologischer Vorhersagemethoden zu wünschen. Danke für Ihre Aufmerksamkeit.

Многие рефераты этого съезда тесно связаны с нашей работой в ВМО, к примеру - применение данных, полученных от спутников, для прогнозирования. В большинстве случаев здесь дело касается метеорологических данных спутников, которые входят в всемирную систему обмена данными ВМО.

Разумеется, мы следим и за совместной работой придунайских государств с большим интересом. ВМО была представлена на всех предшествующих съездах, и я очень рад тому, что могу присутствовать на этом 8-ом съезде. Мои дамы и господа, я желаю больших успехов в работах Вашего съезда! Большое спасибо за внимание.

А.И.Афанасьев

Дунайская Комиссия - Будапешт

Уважаемые коллеги, дорогие друзья,

разрешите приветствовать вас от имени секретариата Дунайской Комиссии и пожелать вам успехов в работе. Деятельность этой конференции представляет существенный интерес с точки зрения выполнения задач возложенных на Дунайскую Комиссию. Координация гидрометеорологической службы на Дунае, высококачественное обслуживание судоходства Дунайского немыслимо без надежных гидрологических прогнозов - и гидрологических прогнозов, добавлю, всех видов, которые включены в программу настоящей конференции. Дунайская Комиссия постоянно занимается разными аспектами этой проблемы: оценка прогнозов необходимых для разработки соответствующих методов данных и обзор состояния различных методов гидрологических прогнозов. Все эти вопросы систематически включаются в повестку дня очередных сессий Дунайской Комиссии. Самый свежий пример последней 33-ей сессии Дунайской Комиссии подчеркнул необходимость усиления работы по совершенствованию методов долгосрочных прогнозов уровней воды. Интерес Дунайской Комиссии к деятельности конференции явнее является чисто академическим вопросом. Много из того, что было послушано на предыдущих конференциях используется в оперативной практике придунайских стран для повышения качества обслуживания Дунайского судоходства. Как известно, решением Комиссии создана рабочая группа по гидрологии Дуная, в программе которой большое внимание уделяется также гидрологическим прогнозам. И впредь Дунайская Комиссия будет использовать результаты будущих конференций при совершенствовании методов гидрометеорологического обслуживания. В заключении я хотел бы отметить бесспорный факт, что мы гидрологи крепко сдружились на ниве этих конференций, старших теперь уже традиций и конечно в дальнейшем эта дружба будет расти и крепнуть. Мне очень больно сознавать, что мы потеряли большого друга, крупного ученого профессора Марчинкова, много сделавшего для укрепления нашего сотрудничества. Разрешите мне еще раз пожелать успехов в работе нашей конференции и всем вам крепкого здоровья и прежней неиссякаемой энергии при совершенствовании методов гидрологических прогнозов. Благодарю за внимание.

Hydrologische Vorhersagen

Akademische Utopie oder praxisbezogene Wissenschaft?

Professor Dr. R. Keller

-    Wissenschaftlicher Vorsitzender des IHP-Nationalkomitees der  
Bundesrepublik Deutschland

Mit der VIII. Donaukonferenz über hydrologische Vorhersagen in Regensburg schließt sich die erste Runde dieser Konferenz der Donauanliegerstaaten. Im Jahre 1961 fand in Budapest die erste dieser Zusammenkünfte statt. Damals wurde beschlossen, zukünftig in etwa zweijährigem Turnus eine Konferenz über hydrologische Vorhersagen durchzuführen. Seither ist jeder der acht Anliegerstaaten Gastgeber dieser Fachkonferenz gewesen.

Die acht Donauanliegerstaaten haben sich 1961 zur Zusammenarbeit bereitgefunden, weil im Hinblick auf eine gemeinsame und optimale Nutzung des Wasserschatzes auch eine gemeinsame Lösung der Probleme angestrebt werden muß. Zusammenarbeit ist sinnvoll, weil die hydrologischen Daten nach vergleichbaren Verfahren gewonnen werden müssen und weil die Angleichung der Daten und der Auswertungsmethoden, die bislang in der Regel nur bilateral stattfand, von großer Bedeutung ist. Schließlich wäre die finanzielle Belastung eines einzelnen Landes zu groß, wenn jedes Land versuchen würde, die Probleme für sich allein zu lösen.

Rückblickend kann festgestellt werden, daß in der Zusammenarbeit der Donauanliegerstaaten im Rahmen dieser Konferenz während der letzten 15 Jahre mit verhältnismäßig geringen finanziellen Mitteln, jedoch mit viel Idealismus eine erfolgreiche und freundschaftliche Zusammenarbeit der Hydrologen und Wasserwirtschaftler des Donauraums erwachsen ist. Es ist eine Aufgabe dieser VIII. Konferenz der Donauanliegerstaaten zu entscheiden, ob 1977 eine 2. Konferenzrunde begonnen werden soll, zu entscheiden, ob die Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wichtigen hydrologischen Vorhersagen wie bisher weitergeführt werden soll.

Die Vorhersage von Eintritt und Verlauf zukünftiger Ereignisse, die unser Leben beeinflussen oder sogar bestimmen, ist seit jeher ein beliebtes Thema, ein Wunschziel der Menschheit. Vorhersage in allen Bereichen unseres Lebens ist eingebettet zwischen Utopie, Scharlantanie, Pseudowissenschaft und exakter Naturwissenschaft. Selbst im Bereich moderner naturwissenschaftlicher Vorhersagen ist das Gespenst der Utopie nicht gebannt.

Vorhersagen im Bereich der Naturwissenschaften gründen sich auf physikalische Zusammenhänge und statistische Gesetzmäßigkeiten. Wie schwierig aber gute Vorhersagen zu geben sind, zeigt die Meteorologie. Wieviel Geld mußte in die meteorologischen Dienste für Wettervorhersage investiert werden, um zu Ergebnissen zu kommen! Die kurzfristige Wettervorhersage hat schon eine recht gute, wenn auch nicht 100-prozentige Trefferrate. Die Langfristvorhersage ist jedoch noch sehr problematisch.

Hydrologische Vorhersagen hängen von der Wettervorhersage, insbesondere von der Niederschlagsvorhersage ab. Sind bei dieser kausalen Abhängigkeit und bei dem im Vergleich zum meteorologischen Beobachtungsnetz viel spärlicheren hydrologischen Meßstellennetz hydrologische Vorhersagen überhaupt durchführbar? Wenn es keine überzeugende meteorologische Langfristvorhersage gibt, wie kann es dann eine langfristige hydrologische Vorhersage geben, was hat dann das Thema "Langfristvorhersage" im Programm der VIII. Konferenz zu suchen? Und in welchem krassem Mißverhältnis stehen zu dem die finanziellen Aufwendungen und personellen Möglichkeiten für die meteorologische Vorhersage einerseits und die hydrologische Vorhersage andererseits.

Es ist richtig, daß die hydrologischen Vorgänge von den Niederschlagsereignissen abhängig sind, aber sie sind nicht nur von meteorologischen Gegebenheiten abhängig, und das ist ein Vorteil für die hydrologische Vorhersage.

### Гидрологические прогнозы

#### Академическая утопия или наука, связанная с практикой?

Р. Келлер

Восьмая конференция придунайских государств в Регенсбурге по гидрологическим прогнозам завершила первый круг этих конференций. В 1961 году в Будапеште состоялась первая из этих встреч. Тогда было решено проводить в будущем приблизительно в два года одну конференцию по гидрологическим прогнозам. С тех пор каждое из восьми прилегающих государств принимало у себя гостей этой профессиональной конференции.

Эти восемь придунайских государств проявили в 1961 году готовность к совместной работе, так как с точки зрения совместного и оптимального использования водных ресурсов необходимо стремиться к совместному решению проблем. Сотрудничество имеет большой смысл, так как гидрологические данные должны быть получены сопоставимыми способами и так как согласованность данных и методов обобщения, которое до сих пор, как правило, проводилось лишь на двусторонней основе, имеет большое значение. Наконец, финансовая нагрузка одной отдельной страны была бы слишком большой, если бы каждая страна попыталась разрешить проблем в отдельности.

Оглядываясь назад, можно установить, что сотрудничество придунайских государств в рамках этих конференций в течении последних 15-ти лет с относительно скромными финансовыми средствами, все же с большой беззаветностью выросло в плодотворную и дружественную совместную работу гидрологов и гидротехников придунайского пространства. Одной из задач этой VIII конференции придунайских государств является разрешение вопроса о том, должен ли начаться в 1977 году второй круг этих конференций; необходимо ли продолжить совместную работу в области важных гидрологических прогнозов.

Предсказание наступления и протекания будущих событий, оказывающих влияние на нашу жизнь, или даже определяющих ее, является излюбленной темой, целью желаний человечества. Предсказания во всех областях нашей жизни вросли в утопию, шарлатанство, псевдонауку и точное естествознание. Даже из областей новейших естественнонаучных прогнозов не изгнан призрак утопий.

Прогнозы в области естествознания основываются на физических связях и статистических закономерностях. Как трудно, однако, составлять хорошие прогнозы показывает метеорология. Сколько денег необходимо было инвестировать в метеорологической службе для прогноза погоды, чтобы прийти к результатам! Краткосрочные прогнозы погоды уже имеют хорошую, хотя и не 100-процентную, квоту совпадения. Однако долгосрочные прогнозы все еще сильно проблематичны.

Гидрологические прогнозы зависят от прогнозов погоды, особенно от прогнозов выпадения осадков. Возможно ли вообще давать гидрологические прогнозы при этой каузальной зависимости и при значительно более скудной, по сравнению с метеорологической сетью наблюдения, гидрологической измерительной сетью? Если нет убедительных долгосрочных метеорологических прогнозов, то как можно тогда составлять долгосрочный гидрологический прогноз, и за чем тогда включена тема "Долгосрочные прогнозы" в программе VIII конференции? И в какой разительной диспропорции находятся к тому же финансовые ассигнования и персональные возможности для метеорологических прогнозов с одной стороны и гидрологических прогнозов с другой стороны.

In die hydrologische Vorhersage gehen Parameter ein, die beliebige Werte annehmen können, aber für jedes Einzelereignis einen festen Wert haben, Parameter, die sich kaum ändern, die vom Witterungsablauf des Vorhersagezeitraums unabhängig, aber abhängig von der vorangegangenen Witterung sind. Diese z.T. quasikonstanten, für ein Flußgebiet charakteristische Größen (math. = "beliebig, aber fest") und auch Vorgänge, die dem vorherzusagenden hydrologischen Ereignis vorausgehen, sind also zahlenmäßig für die Vorhersage faßbar. Das sind z.B. Werte für die aufgrund des Vorwetters gegebene Bodenfeuchte, für das Wasserspeichungsvermögen des Bodens und Gesteins, für den Wasserverbrauch der Vegetation, für die Abflußverzögerung oder -beschleunigung durch die Bodenbedeckung bzw. Bodennutzung, für die Reliefenergie.

Ihr Einfluß auf das vorherzusagende Ereignis ist also feststellbar, und damit gewinnt die Vorhersage an Wert und Sicherheit.

Die große Zahl der zu berücksichtigenden Parameter ist ein Nachteil dieser sogenannten "mathematisch-parametrischen" oder "deterministischen" Methoden der hydrologischen Vorhersagen. Die Folge ist, daß es zu viele Verfahren dieser Art gibt. In den entsprechenden mathematischen Modellen werden zwischen 3 und 30 Parameter verwandt. Faktorenanalyse und Optimierungsverfahren sollen die praktische Handhabung und Anwendbarkeit dieser Modelle verbessern. Schließlich ist es eine der Aufgaben unserer Konferenzen, die theoretischen Überlegungen so zu formulieren, daß sie in der Praxis der Wasserwirtschaft anwendbar sind.

Neben den angedeuteten deterministischen Verfahren gewinnen die rein statistischen Methoden, die vielfach auf Gedanken der Wahrscheinlichkeitstheorie aufbauen, an Bedeutung. Auch dazu werden in Referaten während dieser Konferenz Beispiele gegeben werden.

Die Berechtigung und Bedeutung hydrologischer Vorhersagen läßt sich auch mit einem anderen Gedanken belegen: Auf den Niederschlag hat der Mensch praktisch keinen Einfluß; zu unbedeutend sind bisher die Erfolge in der künstlichen Erzeugung von Niederschlägen in Trockengebieten oder zur Schadenverhütung. Aber auf die meisten der übrigen für die hydrologische Vorhersage relevanten Parameter kann der Mensch Einfluß nehmen, z.B. durch die Veränderung der Bodennutzung, Veränderung von Wald- und Landwirtschaft, durch flächenhafte Oberbauung im Zuge der Verstädterung und Industrialisierung, durch den Ausbau der Flüsse, durch die Anlage großer künstlicher Seen und den Bau von Kraftwerken. Es läßt sich durchaus sagen, welche Folgen diese Maßnahmen auf den Ablauf zukünftiger Hochwasser haben.

Sicherlich wird der eine oder andere, der der hydrologischen Praxis etwas ferner steht, fragen, ob es in Ungarn überhaupt interessiert, was in den bayerischen Gewässern geschieht. Für die Hochwasserverhältnisse der Donau in Österreich und teilweise auch in Ungarn und Jugoslawien ist in der Regel die Flutwelle des Inn bestimmend. Die Inn-Welle läuft einige Tage vor der aus Bayern kommenden Donau-Welle ab. Die österreichischen Alpenflüsse haben ihre Höchstabflüsse meistens etwa zwei Tage vor dem Eintreffen der Inn-Welle (vgl. W. KRESSER 1973, S. 90). Die Nebenflüsse der Donau können im Hauptstrom gefährliche Hochwasserspitzen erzeugen. Also ist man in Österreich, Ungarn und Jugoslawien auch daran interessiert, wie die Inn-Hochwasser und Inn-Niedrigwasserereignisse in 10 oder 20 Jahren ablaufen werden. Wenn durch Änderung der Bodennutzung und wasserbauliche Maßnahmen in Zukunft die Hochwasserwellen der Oberlieger die Unterlieger 2 Tage schneller erreichen, können sie mit den Hochwasserwellen der Nebenflüsse zusammentreffen.

Auch die Niedrigwasser im Unter- und Mittellauf des Stromes werden von den Verhältnissen im Oberlauf mitbestimmt. Zwar ist es selten, daß Niedrigwasser gleich an allen Flüssen des weiten Donaustromgebietes beobachtet werden. Dies trifft nur bei speziellen Hochdrucklagen zu.

Häufig aber haben Teilgebiete der Donau Niedrigwassererscheinungen, die im Unterlauf für die Schifffahrt, die Wasserkraftnutzung oder die Bewässerung merkbare Folgen haben können.

Im natürlichen Abflußregime der Donau konzentrieren sich die Niedrigwasser im Oberlauf vornehmlich auf den Winter, im Unterlauf dagegen auf den Herbst. Infolge des Ausbaus des Stromes, insbesondere durch den Bau

Верно, что гидрологические процессы находятся в зависимости от результатов выпадения осадков, но они зависят не только от метеорологических данных и это является преимуществом гидрологических прогнозов.

В гидрологическом прогнозе имеются параметры, которые могут принимать любые значения, но которые для каждого единичного результата принимают устойчивые значения, параметры, которые не зависят от истечения предсказанного срока состояния погоды, но зависят от вышеупомянутого состояния погоды. Эти, частично квазипостоянные, характерные для изменяющейся области величины (матем. = "любые, но устойчивые") и процессы, которые предшествуют предсказываемое гидрологическое явление, численно уловимы для прогноза. Это, например, значения для влажности почвогрунта, полученные на основе предшествовавшей погоды, для влагоемкости почвогрунта и породы, для водопотребления растительностью, для замедления или ускорения стекания воды через почвенный покров или в связи с землепользованием для рельефной энергии. Их влияние на предсказываемое явление, значит, определяемо и этим прогноз выигрывает в ценности и достоверности.

Необходимое большое количество параметров, является недостатком так называемых "математично-параметрических" или "детерминистических" методов гидрологических прогнозов. Это вызывает наличие чрезмерно большого количества способов этого типа. В соответствующих математических моделях используются от 3-х до 30-ти параметров. Факторный анализ и способы оптимизации должны улучшить возможности практического использования и пригодность этой модели. Наконец, одной из задач нашей конференции состоит в формулировке теоретических размышлений таким образом чтобы они стали употребительными в практике водного хозяйства.

Рядом с указанными определенными способами приобретают значение чисто статистические методы, многократно созданные на основе теории вероятностей. И по этому вопросу будут приведены примеры в рефератах этой конференции.

Оправдываемость и ценность гидрологических прогнозов можно выразить и другими словами: На природные осадки человек практически повлиять не может; слишком малозначительны пока успехи в области искусственного вызывания осадков в засушливых районах или с целью предотвращения повреждений. Но на большинство других важных параметров, используемых в гидрологическом прогнозе, человек может повлиять, например, посредством изменения землепользования, изменения лесного и сельского хозяйства, посредством двумерной застройки в процессе разрастания городов и индустриализации, посредством регулирования рек, сооружения больших искусственных озер и строительства гидроэлектростанций. Вполне можно предсказать, какие последствия повлекут за собой эти мероприятия на процесс развития будущих половодий.

Не хорошо знающие гидрологическую практику, наверняка спросят друг друга, интересуются ли вообще в Венгрии, что произойдет в баварских водных системах. Режим паводков Дуная в Австрии, а частично и в Венгрии и Югославии, как правило, определяется паводочной волной Инна. Волна Инна стекает за несколько дней до прихода дунайской волны из Баварии. Из австрийских альпийских рек вытекает самое большое количество воды, как правило, приблизительно за два дня до поступления волны Инна (см. В.Крессер, 1973, стр.90). Притоки Дуная могут создавать в его главном течении опасные пики паводков. Значит в Австрии, Венгрии или Югославии тоже интересуются режимом половодья и межени реки Инна в следующие 10 или 20 лет. Если в будущем, вследствие изменений землепользования и гидростроительных мероприятий, волны паводков верховья достигнут низовья на 2 дня быстрее, то они могут совпадать с волнами паводков притоков.

И межени в нижнем и среднем течениях реки зависят от условий в верхнем течении. В практике встречается редко, чтобы межени наблюдались одновременно во всех реках большого Дунайского

von Wasserspeichern im Zusammenhang mit der Verbesserung der Schifffahrt und Nutzung der Wasserkräfte ist die Niedrigwasserführung in den letzten Jahrzehnten mehr und mehr erhöht worden zum Vorteil der Nutzer, z.B. "im Winterdurchschnitt um 81 cbm/sek., bei einer Erhöhung des kritischen Niedrigwasserabflusses im Monat Februar um nicht weniger als 121 cbm/sek. im Mittel", wie W. Kresser für die österreichische Donau bei Wien angibt (1973, nach einer Untersuchung der Tiroler Wasserkraftwerke AG.). Wenn alle Projekte der Wasserspeicherung im Einzugsgebiet oberhalb von Wien ausgeführt würden, würde die Niedrigwasserauffüllung im Winter auf 144 cbm/sek. und im Februar sogar auf 215 cbm/sek. ansteigen. Auf der anderen Seite vermindern die Wasserspeicher aber auch die Hochwasserspitzenabflüsse, wodurch die Hochwasser weniger gefährlich werden. Selbstverständlich gehört es zu den hydrologischen Prognosen, die Einflüsse wasserbaulicher Maßnahmen auf die Abflußerscheinungen zu erfassen und vorauszusagen.

Die wasserbaulichen Maßnahmen verändern auch die Geschiebe- und Schwebstoffführung der Flüsse. Wo vorher bei größerer Strömung größere Geschiebe transportiert wurden, werden nach der Einstauung nur noch feinste Korngrößen verlagert. Damit werden die Erosions- und Sedimentationsprozesse anders, wodurch wiederum Rückwirkungen auf Wasserbauten zu erwarten sind. Die Schwebstoffführung ist für die Verlandung der Stauräume von großer Bedeutung. Man kann sagen, daß die Schwebstoffführung in der Donau wichtiger ist als die durchschnittliche Geschiebefracht. Kresser (1973) bemerkt, daß die durchschnittliche Geschiebefracht nicht einmal 25% der Schwebstofffracht ausmacht. Vor allem im Mittellauf und insbesondere im Unterlauf überwiegt die Schwebstofffracht noch extremer. Es wurden an der Donau Extremwerte für die Schwebstofffracht zwischen 3 und 1 300 mgr/l gemessen. Im Ober- und Mittellauf ist die Schwebstofffracht verhältnismäßig gering, an der Save-Mündung vergrößert sie sich sprunghaft und erreicht im Mündungsbereich einen Mittelwert von 340 mgr/l. Nach neueren Untersuchungen der rumänischen Hydrologen werden jährlich 27,5 Millionen Tonnen Schwebstoffe in das Schwarze Meer befördert. Die Menge der Schwebstoffe ist in großem Maß abhängig von der Tätigkeit des Menschen im Zusammenhang mit der Bodennutzung. Durch den Ausbau der Donau mit Staustufen, Kraftwerksanlagen und Uferbegradigungen werden auch die Eisverhältnisse und Wassertemperaturen beeinflusst.

Das sollten aus der Fülle eines umfassenden Kataloges nur wenige Beispiele sein, die erklären, warum eine internationale Zusammenarbeit bei der Lösung hydrologischer Probleme notwendig ist.

Das Jahr 1965 ist für die Entwicklung der wissenschaftlichen Hydrologie in fast allen Ländern der Erde ein wichtiger Zeitpunkt. 1965 wurde von der UNESCO die Internationale Hydrologische Dekade proklamiert. 112 Mitgliedsstaaten der UNESCO und mehrere staatliche und nicht-staatliche wissenschaftliche Organisationen beteiligten sich am wissenschaftlichen Programm der IHD. Die IHD verlief außerordentlich erfolgreich, und man darf feststellen, daß die hydrologische Wissenschaft während der IHD größere Fortschritte gemacht hat als in mehreren Jahrzehnten zuvor.

Ein wesentlicher Programmpunkt der IHD war die Förderung der internationalen Zusammenarbeit in den großen Flußgebieten. Nach dem Beginn der IHD 1965 wurde daher die schon 1961 begonnene Zusammenarbeit im Donauraum im Hinblick auf die hydrologischen Vorhersagen ein Bestandteil des IHD-Programms. Dadurch wurde die Arbeit beträchtlich aktiviert. Die Intensivierung hydrologischer Forschung läßt sich nicht einwandfrei widerspiegeln in einigen Zahlen, dennoch seien einige Zahlen genannt.

Auf den ersten Konferenzen der Donauländer über hydrologische Vorhersagen 1961 in Budapest, 1963 in Graz und 1965 in Bukarest wurden jeweils 7 Vorträge gehalten. Die vierte Konferenz 1967 in Bratislava sah bereits 16 Vorträge auf dem Programm, und in den folgenden Jahren bei den Tagungen in Belgrad 1969, Kiew 1971, Varna 1973 standen zwischen 44 und 54 Vorträge zur Diskussion. Im Regensburger Programm 1975 mußte das Organisationskomitee 53 Vorträge und 5 Generalberichte unterbringen. Die Zahl der Vortragsanmeldungen lag sogar etwas höher, wurde aber mit Rücksicht auf die von der vorbereitenden internationalen Konferenz 1974 gesetzten Schwerpunkte reduziert.

Nicht nur die Anzahl der Vorträge, sondern auch die Thematik weitete sich aus. In der ersten Konferenz 1961 standen Wasserstand und Abfluß im Vordergrund. Diese Themen bleiben auch bis heute beherrschend. Im ersten

На первых конференциях по гидрологическим прогнозам в 1961 г. в Будапеште, в 1963 г. в Граце и в 1965 г. в Бухаресте было прочитано каждый раз по 7 докладов. Четвертая конференция в 1967 г. в Братиславе уже имела в программе 16 докладов, и в последующие годы на конференциях в Белграде (1970), Киеве (1971), Варне (1973), к дискуссии было представлено между 44 и 54 докладов. В Регенсбургскую программу в 1975 году организационному комитету пришлось включить уже 53 доклада и 5 генеральных докладов. Число заявок на чтение докладов было еще несколько больше, однако, с учетом разработанных на международной конференции в 1974 году главных задач, это число было редуцировано.

Не только число докладов, но и тематика расширялась. На первой конференции в 1961 году стояли на переднем плане вопросы уровня и стока воды. Эти темы остаются господствующими и в настоящее время. В первом 1965 году МГД тематика расширилась уже почти на все круги тем, которые относятся к нашей нынешней программе. С тех пор на конференциях рассматриваются следующие круги тем:

Прогнозы уровня воды и стока, паводков и меженией;  
прогнозы режимов льда, морфологических явлений, качества воды и режима подземных вод в бассейне Дуная.

Международное сотрудничество в области стандартизации гидрометрических методов, установление новых мерных постов, накопление и согласование данных и, не в последнюю очередь, внедрение электронно-вычислительной техники для анализа данных привели к быстрому развитию гидрологических методов. В области научной гидрологии от этого особенно выиграл сектор гидрологических прогнозов. Одной из целей Дунайской конференции по гидрологическим прогнозам является такая разработка новых гидрологических методов, чтобы они стали пригодными для практики, и другой целью этой конференции является оплодотворение фундаментальных научных исследований исходя из практики.

Я только что проследил области гидрологических предсказаний, с которыми занимались наши конференции. Число этих областей в процессе развития новых способов удвоилось за последние годы, и это произошло благодаря развитию для всех областей как краткосрочного, так и долгосрочного прогнозов. Краткосрочный прогноз занимается единичными явлениями паводков и меженией, ледового режима и расходов твердых веществ и др.. Краткосрочный прогноз занимается "предсказыванием определенного события, которое уже наступило на какую-либо часть бассейна или определенного участка реки" (Крессер) или только началось.

Долгосрочный прогноз относится к более длинному промежутку времени, по меньшей мере к 3-м - 4-м месяцам. Можно ли говорить о прогнозе, если делаются попытки "предсказывать" из имеющихся данных ход или повторяемость гидрологических процессов в течении 2-х лет, 10-ти или 100 лет - это дело взгляда. При этом возникают трудности, основанные на климате и его изменениях. В рамках обычных колебаниях климата имеются "разбросы климата", которые внезапно изменяют протекание климата. Эти колебания климата невозможно предвидеть на основе наших современных знаний. Другой трудностью долгосрочных гидрологических прогнозов является влияние человека на гидрологические процессы.

Исследование антропогенного влияния на гидрологические процессы является в настоящее время главной задачей "Международной гидрологической программы", которая следовала за международной гидрологической декадой в 1975 году и которая должна на долгие годы координировать международное сотрудничество в гидрологии. Если антропогенные изменения в реках и водосборных бассейнах известны, то их влияние частично уже можно оценивать количественно.

Число развитых в последние годы способов в области прогноза так велико, что даже специалист затрудняется запомнить их обзор. На подготовительном заседании придунайских стран в 1974 го-

Jahr der IHD 1965 hatte sich die Thematik schon auf fast alle Themenkreise erweitert, die zu unserem derzeitigen Programm gehören. Die Themenkreise der Konferenz sind seither:

Vorhersage im Bereich von Wasserstand und Abfluß, von Hoch- und Niedrigwasser; Vorhersage der Eisverhältnisse, der morphologischen Erscheinungen, der Wasserbeschaffenheit und der Grundwasserhältnisse im Einflußbereich der Donau.

Die internationale Zusammenarbeit im Bereich der Standardisierung der hydrometrischen Verfahren, der Einrichtung neuer Meßstellen, der Datensammlung und der Datenabstimmung und nicht zuletzt der Einsatz von Techniken der elektronischen Datenverarbeitung zur Analyse der Daten führten zu einer raschen Entwicklung hydrologischer Methoden. Davon hatte im Bereich der wissenschaftlichen Hydrologie vor allem der Sektor der hydrologischen Vorhersage großen Nutzen. Es ist ein Ziel der Donaukonferenz über hydrologische Vorhersagen, die neuen Verfahren der Praxis nutzbar zu machen, und es ist ein anderes Ziel dieser Konferenz, aus der Praxis heraus die wissenschaftliche Grundlagenforschung zu befruchten.

Ich habe eben die Bereiche hydrologischer Vorhersagen, mit denen sich die Konferenzen befassen, aufgeführt. Die Anzahl dieser Bereiche hat sich in den letzten Jahren infolge der neuentwickelten Verfahren verdoppelt, und zwar dadurch, daß für alle Bereiche eine kurzfristige Vorhersage und eine langfristige Vorhersage entwickelt wird. Die kurzfristige Vorhersage befaßt sich mit Einzelereignissen der Hoch- und Niedrigwasser, der Eisverhältnisse und des Feststofftransports u.a.m. Die kurzfristige Vorhersage ist "die Vorausbestimmung eines Ereignisses, das in einem Teil des Einzugsgebietes oder Flußabschnitts schon eingetreten ist" (Kresser) oder begonnen hat.

Die langfristige Vorhersage bezieht sich auf einen längeren Zeitraum, mindestens auf einen Zeitraum von 3 - 4 Monaten. Es ist Anschauungssache, ob man auch von Vorhersage sprechen kann, wenn versucht wird, aus den verfügbaren Daten "vorauszusagen", wie die hydrologischen Prozesse in 2 Jahren, in 10 oder 100 Jahren ablaufen werden oder wiederkehren werden. Dabei gibt es Schwierigkeiten, die im Klima und seinen Veränderungen begründet sind. Im Rahmen der üblichen Klimaschwankungen gibt es "Klimaverwerfungen", die plötzlich einen anderen Klimaablauf auslösen. Die Klimaschwankungen sind aufgrund unserer derzeitigen Kenntnisse nicht vorhersehbar. Eine weitere Schwierigkeit bei der hydrologischen Langfristvorhersage ist der Einfluß des Menschen auf die hydrologischen Prozesse.

Die Untersuchung des anthropogenen Einflusses auf hydrologische Vorgänge ist z.Zt. ein Schwerpunkt im "Internationalen Hydrologischen Programm", das die Internationale Hydrologische Dekade 1975 ablöste und auf Jahre hinaus die internationale Zusammenarbeit in der Hydrologie koordinieren soll. Wenn die anthropogenen Maßnahmen an den Strömen und in den Einzugsgebieten bekannt sind, können sie auch bereits teilweise in ihren Wirkungen quantitativ erfaßt werden.

Die Zahl der in den letzten Jahren entwickelten Vorhersageverfahren ist so groß, daß selbst der Fachmann Mühe hat, die Übersicht zu behalten. Auf der vorbereitenden Sitzung der Donauländer, die 1974 in München stattfand, wurden daher für die VIII. Konferenz in Regensburg Schwerpunkte gesetzt und weiterhin beschlossen, daß jedes Land eine Übersicht über die in seinem Bereich in der Praxis angewandten Vorhersagemethoden zu den einzelnen Schwerpunkten geben soll.

Die Schwerpunkte dieser VIII. Konferenz sind:

Kurzfristige und langfristige Wasserstands- und Abflußvorhersagen, insbesondere für die Hoch- und Niedrigwasser,  
Vorhersage von Eiserscheinungen,  
Vorhersage flußmorphologischer Veränderungen.

бассейна. Такое явление возникает только при высоком атмосферном давлении. Часто проявляются межени на отдельных участках Дуная, которые в нижнем течении имеют заметные последствия для судоходства, использования гидросиловых установок или орошения.

При естественном режиме течения Дуная межени в верхнем течении концентрируются главным образом зимой, в нижнем течении, напротив осенью. В процессе использования реки, особенно для строительства водохранилищ в связи с улучшением судоходства и использования гидроэнергии в последние десятилетия, на пользу потребителем, все более поднимались водоносность во время межени, например, "зимой в среднем на  $81 \text{ м}^3/\text{сек}$ ; при повышении критического расхода в межени период в феврале месяце не менее, чем на  $121 \text{ м}^3/\text{сек}$  в среднем", как указывает В. Крессер для австрийского Дуная в области Вены (1973, по данным исследования Тирольских гидроэлектростанций А0). При выполнении всех проектов по накоплению воды в Дунайском бассейне выше Вены, заполнение воды во время межени повысилось бы зимой на  $144 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а в феврале даже на  $215 \text{ м}^3/\text{сек}$ . С другой стороны водохранилища уменьшают и пиковые паводочные стоки, что способствует предотвращению опасности половодья. Само собой разумеется, что определение и предсказание влияний гидростроительных мероприятий на режим стока являются частью гидрологического прогнозирования.

Гидростроительные мероприятия меняют также расход донных и взвешенных наносов в реках. Где прежде при больших течениях транспортировались большие донные наносы, переносятся после запруживания лишь мельчайшие частицы. При этом изменяются эрозионные и седиментационные процессы, вследствие чего можно ожидать обратного воздействия на гидросооружения. Расход взвешенных наносов имеет большое значение для омеления водохранилищ. Можно сказать, что расход взвешенных наносов играет в Дунае большую роль, чем среднее значение стока донных наносов. Крессер (1973) отмечает, что среднее значение стока донных наносов составляет менее 25% от стока взвешенных наносов. Прежде всего в среднем течении, но особенно в нижнем течении экстремально преобладает сток взвешенных веществ. Экстремальные значения стока взвешенных наносов получены для Дуная между 3 и  $1.300 \text{ мг/л}$ . В верхнем и среднем течениях сток взвешенных наносов сравнительно мал, у устья Савы он скачкообразно увеличивается и достигает в области устья среднее значение в  $340 \text{ мг/л}$ . Согласно новым исследованиям румынских гидрологов в Черное море транспортируется ежегодно 27,5 миллионов тонн взвешенных наносов. Количество взвешенных наносов зависит в большой степени от деятельности человека в сочетании с землепользованием. Сооружение на Дунае переправ, гидроэлектростанций и выпрямлений берегов оказывает влияние также на ледовый режим и температуры воды.

Это должно рассматриваться лишь как несколько примеров из богатства обширного каталога, которые поясняют, почему необходимо интернациональное сотрудничество при решении гидрологических проблем.

1965 год является для всех стран Земли важным моментом в развитии научной гидрологии. В 1965 году прокламировала ЮНЭСКО Международную гидрологическую декаду (МГД). 112 государств-членов ЮНЭСКО и многие правительственные и неправительственные научные организации приняли участие в научной программе МГД. МГД прошла необычайно успешно, и можно утверждать, что гидрологическая наука продвинулась во время МГД дальше, чем за несколько десятилетий до этого.

Важным пунктом в программе МГД явилось поощрение международного сотрудничества в бассейнах больших рек. После начала МГД в 1965 году стало составной частью программы МГД также и сотрудничество в бассейне Дуная по вопросам гидрологических прогнозов, начатое уже в 1961 году. Посредством этого работа была значительно активизирована. Интенсификацию гидрологических исследований невозможно охарактеризовать несколькими числами, однако назовем все же несколько чисел.

Einleitend zu diesen Generalthemen werden die erwähnten Länderberichte zusammenfassend vorgetragen. Dadurch soll die gegenseitige Information und Koordination gefördert werden.

Die Donaukonferenzen über hydrologische Vorhersagen befassen sich nicht mit rein akademischen Fragen; die Themen sollen möglichst einen breiten Bezug zur Praxis haben. Dieser Bezug zur Praxis heißt nicht nur Abwendung von Gefahren, von Gefahren, die durch Wassermangel und Wasserüberfluß, durch Eiserscheinungen oder durch die Verlandung von Stauräumen und erhöhte Erosion unterhalb von Flußbauwerken für diese Bauwerke entstehen. Es handelt sich auch nicht nur um die Abwendung von Gefahren, die durch eine Veränderung der Wasserbeschaffenheit drohen, sondern es geht bei der hydrologischen Vorhersage auch darum, die Wassernutzung optimal zu gestalten.

Die Interessen der verschiedenen Länder an der Donau sind durchaus verschieden gelagert und befinden sich z.T. in Widerspruch: die einen sind in erster Linie an der Schifffahrt interessiert, die anderen an der Energiegewinnung und andere wiederum an der Wasserentnahme aus der Donau und ihren Terrassenschottern für die Bewässerung und Wasserversorgung. Glücklicherweise ist kein Land daran interessiert, die Donau als Transportmittel für das Abwasser zu benutzen.

Die gegensätzlichen Interessen werfen Probleme auf. Die Wasserwirtschaft muß daher koordiniert werden. Wasserwirtschaft bedeutet Eingreifen des Menschen, und ich habe angedeutet, daß dieses Eingreifen des Menschen auf hydrologische Prozesse nicht nur auf wasserwirtschaftliche oder wasserbauliche Maßnahmen beschränkt ist; es umfaßt vielmehr sämtliche Tätigkeiten des Menschen im Einzugsbereich eines Flusses. Die Auswirkungen der menschlichen Aktivitäten im Einzugsbereich der Donau auf die hydrologischen Prozesse müssen erkannt und vorausgesagt werden.

Die Technik hat große Möglichkeiten zur Umgestaltung der Natur eröffnet, aber auch die Gefahr erhöht, weite Bereiche der Natur irreversibel zu zerstören. Dabei ist der Wasserhaushalt besonders anfällig. Wir kennen auch Beispiele von der Donau, die zeigen, daß heute die Hochwasserspitzen extremer, die Laufgeschwindigkeit der Wellen kürzer, die Wasserabflüsse also schneller und erosionsstärker sind als früher.

Ist das nur auf eine Veränderung der Niederschlagsverhältnisse zurückzuführen oder führten Eingriffe des Menschen in die Landschaft der Einzugsgebiete und in den Flußverlauf zu diesen Veränderungen im Abfluß? Die hydrologische Grundlagenforschung ist heute so weit, daß hydrologische Auswirkungen anthropogener Eingriffe in die Natur vorhersehbar sind.

Zum Studium anthropogener Eingriffe und ihrer hydrologischen Auswirkungen sind nicht nur Elektronik und moderne mathematisch-statistische Verfahren nützlich, sondern auch Literaturquellen aus früheren Jahrhunderten, in denen oft vorzügliche Beschreibungen über die Gewässer, ihren Zustand, ihren Nutzen und ihre Gefahren gegeben werden.

Friedrich Wilhelm Breuninger veröffentlichte 1719 (Tübingen) eine inhaltsreiche Monographie über "Die Urquelle Des Welt-berühmten Donau-Stromes". In diesem Werk werden viele Fragen angesprochen, die heute noch von Interesse sind.

Auch im Donaugebiet gibt es Flüsse und Bäche, die früher immer flossen, die Gewerbe und Industrie dienten, die heute aber zu wenig Wasser führen oder zeitweise sogar trocken fallen. An der oberen Donau besteht eine karsthydrologische Verbindung zum Rhein. Hier trat vor 100 Jahren zum ersten Mal eine Vollversickerung auf, ein Phänomen, das für den betroffenen Raum, für die Siedlungen, das Gewerbe und die Industrie talabwärts schwerwiegende Folgen hatte.

Seit der ersten Vollversickerung im Jahre 1874 wiederholte sich dieser Vorgang, zunächst selten, dann häufiger. Die Zahl der Vollversickerungen wuchs an und erreichte 1921 den bisherigen Höchstwert mit 309 Tagen (nach einer nicht veröffentlichten Untersuchung von E. Schad, Geographisches Institut der Universität Freiburg, 1975).

ду в Мюнхене были predeterminedены главные задачи VIII конференции в Регенсбурге и также было решено, что каждая страна даст к отдельным главным задачам обзорные приложения в своей практике методов прогноза.

Главными задачами этой VIII конференции являются:

Краткосрочные предсказания уровня и стока воды, особенно для паводков и межени;  
прогнозы ледового режима,  
прогнозы гидро-морфологических изменений.

Вступительно к этим генеральным темам будут обобщенно прочитаны названные доклады стран. Это должно способствовать координации и взаимному обмену информацией.

Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам занимаются не только чисто научными вопросами; темы должны иметь возможно более широкое отношение к практике. Эта связь с практикой касается не только предотвращения опасностей, опасных, грозящих речным строительным сооружениям вследствие наводнений или недостатка воды, вследствие ледового режима или омеления водохранилищ и повышенной эрозии ниже по течению речных сооружений. Речь идет, также, не только о предотвращении опасностей, грозящих вследствие изменения качества воды; в гидрологических прогнозах, речь идет также о разработке возможностей оптимального использования воды.

Заинтересованность различных стран в Дунае складывается различно и находится, подчас, в противоречии: одни заинтересованы в первую очередь в судоходстве, другие в выработке энергии, а третьи, напротив, в водозаборе из Дуная и его аккумулятивных террас для орошения и водоснабжения. К счастью ни одна страна не заинтересована в использовании Дуная как транспортное средство сточных вод.

Противоречивость интересов создает проблемы, и поэтому водное хозяйство необходимо координировать. Водное хозяйство означает воздействие человека и я уже отметил, что это воздействие человека не ограничивается лишь водохозяйственными или гидростроительными мероприятиями; оно значительно больше охватывает все виды деятельности человека в бассейне реки. Последствия человеческой деятельности для гидрологических процессов в бассейне Дуная должны быть сознаны и предсказаны.

Техника открыла большие возможности для преобразования природы, но она также увеличила опасность необратимого нарушения широких областей окружающей природы. При этом особенно уязвимым водный режим. Нам известны примеры для Дуная, которые показывают, что сегодня пики паводков более экстремальны, ход скорости волн короче, водные стоки, значит, быстрее и эрозия сильнее чем раньше.

Объяснимо ли это только изменением режима атмосферных осадков, или привело ли воздействие человека на ландшафт речных бассейнов и течение рек к этим изменениям в стоке? Фундаментальные гидрологические исследования развиты в настоящее время до такой степени, что гидрологические последствия антропогенного воздействия на природу сейчас предсказуемы.

Для изучения антропогенных воздействий и его гидрологических последствий полезны не только электроника и современные математико-статистические методы, но и литературные источники из прошлых столетий, в которых часто даются замечательные описания речных систем, их состояний, экономической эффективности.

Фридрих Вильгельм Бройнингер опубликовал в 1719 году (Тюбингия) содержательную монографию про "Первоисточники всемирно-известной реки Дуная". В этом произведении касается много вопросов, которые еще сегодня представляют интерес.

Die Zahl der jährlichen Vollversickerungstage der Donau betrug im Mittel der Jahre (nach Zusammenstellung von Schad unter Verwendung der Untersuchungen von W. Käss, 1969)

1884 - 1905	76,3	Tage
1906 - 1925	133,7	Tage (nach F. Röhrer, 1930)
1923 - 1960	200,2	Tage
(1950 - 1966	169,8	Tage)

Die laufenden Forschungen in Freiburg suchen zu ergründen, ob karsthydrologische Veränderungen oder der Einfluß des Menschen Ursache der Zunahme der Versickerung im oberen Donauegebiet sind.

Hydrologische Vorhersagen sind für den Donaubereich wichtig, weil die Donau als zweitgrößter Strom Europas der wasserwirtschaftlichen Nutzung besondere Möglichkeiten bietet; Vorhersagen für die Donau sind schwierig, weil das Gebiet und der Strom in der natürlichen und wirtschaftlichen Ausstattung außerordentlich vielseitig sind.

Neben allen genannten wissenschaftlichen Gesichtspunkten und Erfolgen der Konferenzen der Donauanliegerstaaten über hydrologische Vorhersagen ist der Beitrag, den die wissenschaftliche Zusammenarbeit für die Verständigung der Völker leistet, nicht zu unterschätzen.

Ich wünsche der VIII. Konferenz der Donauanliegerstaaten über hydrologische Vorhersagen, daß sie die freundschaftliche Zusammenarbeit der Hydrologen im Donauegebiet vertiefen und allen Teilnehmern und Donauländern Erfolg und Nutzen bringen möge.

Ströme verbinden, wo die Menschen es wünschen.

#### L i t e r a t u r h i n w e i s e:

1. Breuninger, F.W. Die Ur-Quelle des welt-berühmten Donau-Stroms, welche in dem Herzogthum Würtemberg und nicht zu Don-Eschingen wie bishero darvor gehalten zu seyn gründlich behauptet wird ..... Tübingen 1719.
2. Käss, W. Schrifttum zur Versickerung der oberen Donau zwischen Immendingen und Fridingen. Steir. Beitr.Hydrogeol. Bd. 21, S. 215 - 246, Graz 1969.
3. --- Die Versickerung der oberen Donau, ihre Erforschung und die Versuche 1969. Geol.Jb. C 2, S. 13-18, Hannover 1972.
4. Kresser, W. Die Donau und ihre Hydrologie Sonderheft Donau der Zeitschr. "Wasser- und Energiewirtschaft", 65. Jg., S. 83 - 99, Baden/Schweiz 1973.
5. Röhrer, F. Donauversickerung und Aachquelle. Ein Bericht über den Stand unserer Kenntnisse. Bad. Geol. Abh. 2, Karlsruhe 1930.
6. Schad, E. Donauversickerung und Aachquelle Unveröffentl. Manuskript Geogr.Inst. I d.Univ. Freiburg/Brg. 1975.

И в районе Дуная имеются реки и ручьи, которые раньше все время текли, служили промыслу и промышленности, но сегодня, однако, несут слишком мало воды или даже совсем высохли. В верхнем Дунае имеется карстовая гидрологическая связь с Рейном. Здесь 100 лет тому назад впервые имело место полное просачивание, феномен, который имел для пораженного пространства, для населенных пунктов, для промысла и промышленности вниз по долине серьезные последствия.

После первого полного просачивания в 1874 году это явление повторялось, сначала редко, потом чаще. Количество полных просачиваний увеличилось и достигло в 1921 году наибольшее известное значение в 309 дней (согласно одной неопубликованной исследовательской работы Э.Шада, географический институт университета в Фрейбурге, 1975).

Количество дней полных просачиваний Дуная составляло в среднем за год (согласно данным Э.Шада и использованным результатом исследований в.Кесса, 1969)

1884 - 1905	76,3 дня
1906 - 1925	133,7 дня (согласно Ф.Рёрера, 1930)
1923 - 1960	200,2 дня
(1950 - 1966	169,8 дня)

Текущие исследования в Фрейбурге ищут обоснований тому, не являются ли карстовые гидрологические изменения или влияние человека причиной увеличения числа полных просачиваний в верхнем районе Дуная.

Гидрологические прогнозы для районов Дуная чрезвычайно важны, так как Дунай, как вторая по величине река в Европе, предоставляет особые возможности для водохозяйственного использования; прогнозы для Дуная затруднительны, так как бассейн и река Дуная по естественным и хозяйственным условиям являются необыкновенно многосторонними.

Кроме всех названных научных точек зрения и успехов конференций Придунайских государств по гидрологическим прогнозам нельзя недооценивать вклад, который вносит научное сотрудничество во взаимопонимание народов.

Я желаю, чтобы VIII конференция Придунайских государств углубила дружеское сотрудничество гидрологов и чтобы она принесла всем участникам и придунайским странам успехов и пользу.

Водные потоки связывают, где люди этого желают.



"Kurzfristige Wasserstands- und Abflußvorhersagen,  
insbesondere für Hochwässer"

"Краткосрочные прогнозы уровней и расходов  
воды, особенно при паводках"

## ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДОКЛАД

## GENERALBERICHT

Краткосрочные прогнозы уровней и расходов воды, особенно  
при паводках

Гладны Й., Бухтеле Й.

Kurzfristige Wasserstands- und Abflußvorhersagen, insbeson-  
dere für Hochwässer

Hladný J., Buchtele J.

Если нам во вступительном слове приходится коротко характеризовать в бассейне Дуная основные черты современного уровня в области краткосрочного прогноза уровней и расходов воды, то мы, по-видимому сможем привести следующие пункты так как они вытекают из национальных сообщений и предлагаемых докладов:

1. В повседневной работе гидрологических служб до сих пор преобладают методы, использующие для прогноза информации о современных уровнях воды или расходах в системе водомерных станций и знаний добегания расходов.
2. В общем считается необходимым использовать в методах гидрологических прогнозов в большой степени информации о причинных метеорологических явлениях, как например осадки, температура воздуха и запасы снега.
3. Продолжение заблаговременности прогнозов и улучшение их качества, именно в бассейнах с водохранилищами, этого достигается применением методов системного анализа. Часто обсуждается именно трансформационные функции системы.
4. Во все большей степени проявляются, с точки зрения прогноза неблагоприятные воздействия искусственного регулирования на режим расходов элиминируются при помощи вычислений основанных на гидравлических методах и стимуляционных процессах для обсуждения движения воды в руслах.

В следующих соображениях мы будем эти пункты документировать не только на основе докладов, предлагаемых в рамках этой конференции, но и на основе опыта из последнего "воркшопа" во время Симпозиума по математическим моделям в гидрологии, которое состоялось в Братиславе в начале сентября этого года.

#### Классические методы прогнозов

Сравнивая все национальные сообщения, представленные на этой конференции, мы видим, что в краткосрочных прогнозах уровней и расходов воды преобладают гидрометрические методы, это значит методы, основанные прежде всего на вступительных элементах, измеренных прямо в русле реки и исходящие из закономерностей, в согласии с которыми поступает движение воды в речной сети. Это подтверждает объем текста, который почти во всех сообщениях этой теме посвящен. Информации о методах и условиях употребления в этом сорте прогноза более подробные (данные о водомерной сети, прогнозовые процессы и формулы, частота прогнозов, история развития метода, достигаемая точность и т.п.).

Хотя этот способ прогноза начал осуществляться на Дунае и его притоках уже в конце прошлого века, это не обозначает, что мы им пользуемся до сих пор, что методы не модернизируются. Новые направления описаны в национальных сообщениях из: 1.ФРГ - автоматический способ группировки информации, 2.ЧССР, ФРГ - обработка прогноза при помощи электронно-вычислительной машины, 3.ВНР - использование статистических подходов во время изучения нестационарного явления, особенно многократная регрессия для вычисления изменений расходов, 4.СССР, БНР - применение динамико-статистических подходов при обсуждении режима стока, именно для продолжения заблаговременности прогноза в периоде низких уровней воды.

Надо сказать, что не только исторические условия в отдельных странах отличаются друг от друга (напр. в Венгрии и Чехословакии внедрялись прогнозы уже в конце прошлого века, в Болгарии только после второй мировой войны), разнообразные даже и природные и технико-экономические условия в отдельных частях Дуная и в бассейнах его притоков. С этой точки зрения большое внимание уделяется напр. в Австрии паводочным ситуациям и стокам из снега, из бассейнов притоков Дуная, в Венгрии прогнозам паводков на собственном течении Дуная, в Болгарии прогнозам в периоде минимальных расходов. Главным общим интересом всех стран, через которые Дунай протекает, является прогноз паводков для противопаводочной защиты и прогноз уровней воды для навигации. В этой области является сотрудничество придунайских стран наиболее развитым. Может быть в будущих национальных сообщениях пришлось бы уделять внимание опыту из оперативного сотрудничества (обмен и гомогенит гидрологическими информацией, согласование терминов, исходность методик и т.п.).

#### Продолжение заблаговременности прогноза и улучшение качества методик прогнозов

Эти вопросы принадлежат к одним из основных требований на гидрологические прогнозы. Стремясь удовлетворить эти требования, начинают гидрологические службы в бассейне Дуная во все большей степени пользоваться прогнозными методиками, которые исходят из изучений о движении воды в бассейне а не только в речной сети. Для этой цели обследуются трансформационные функции бассейна или системы; по степени сложности с которой эта функция выражается возможно изучать и системы с разной мерой сложности.

В гидрологии речь идет почти всегда о натуральных системах со сложной структурой и со стохастическим ходом явлений, поэтому их нельзя описать при помощи аналитических отношений. Их поведение приходится изучать в большинстве случаев при помощи математических моделей бассейна. Если мы в согласии с венгерским национальным сообщением, разработанным доктором Бартом, примем распределение методов прогноза на три группы:

- а) вычисление расходов при помощи уравнений неперманентного течения
- б) статистические процессы
- в) математические модели

нам придется сказать, что большинство докладов, предложенных на этой конференции возможно включить во вторую или третью группу, или они являются комбинациями методов обеих этих групп.

В первую группу возможно включить прежде всего процессы, которые занимаются проблематикой движения воды в речных руслах. Речь идет тоже о методах, которые имеют возможность стать более совершенной заменой до сих пор существующих гидрологических прогнозов, мера точности которых ограничена напр. неравномерностей стока и которые нельзя всегда с успехом применять на реках, режим которых под влиянием искусственного регулирования.

Так как конечно и движение воды не возможно вообще описать аналитическими отношениями, надо применять в этом подходе к проблемам прогноза модельные процессы.

В эту группу именно принадлежит модель Мартинка-Зезулак и Луду. Первый из них обсуждает стоки в исследованной речной части на основе кинематических уравнений о движении воды. Преимуществом этой модели является факт, что он был подготовлен для относительно маленькой вычислительной машины, которая доступна большинству служб. Осуществленные испытания подтверждают его применимость на практике. Модель Луду решает специальную, но в будущем, может быть, очень частую проблему изучения неустановившегося движения ниже гидротехнических сооружений. Если испытания покажут, что модель способна вычислять расходы с удовлетворительными ошибками, в таком случае смогла бы благодаря своей относительной несложности служить хорошим способом для гидрологического прогноза.

Описание движения воды в речной сети, основанное на статистических зависимостях, представляют собой доклады Соседко и Аджелич. В этих случаях имеют прогнозное отношение форму регрессивных уравнений. В первом из них подчеркивается постижение неравномерностей стока в бассейне. Во втором следится за возможностями использования непостоянных регрессивных коэффициентов в зависимости на объеме стока. Включая прогнозное отношение в отдельные группы, тоже доклад Стоев можем понимать как статистический процесс с использованием метеорологических информации. Этот доклад был использован на реке Вардар.

Граница между второй и третьей группой бывает не всегда ясна, большинство прогнозных методов нельзя обозначить ни как только статистическое или структуральное. Часто бывает удобнее отличать модели по исходным информации, целям и стоковой фазе, которую они симулируют. Общим обозначением этого сорта моделей является факт, что они занимаются стоком из целых бассейнов, а не только движением воды в русле.

Значительную группу докладов по теме краткосрочных прогнозов создают доклады, занимающиеся проблемой стока из дождевых осадков. Туда возможно включить доклады Барта, Бефани, Бельчиков, Лыло и Жидкова, Мухин и другие. Доклад Барта представляет собой прогнатический подход к решению этой проблемы в конкретном бассейне на основе известных информации по удостоверенных принципах ( аппликация показателей насыщенности почвы, конволюции и трансформационных функций). Метод вычислений расходов, автором которого Бефани, мы можем обозначить как бесценный теоретически ориентированный процесс, который исходит из логических премисов по генетическим закономерностям режима стока. Проблематику, назначеную Бельчиковым в его докладе, можем считать точно препарированной моделью со сложной структурой, которую возможно выгодно использовать да и при существовании относительно коротких но качественных и многосторонних наблюдений. В докладе Лыло-Житковой рекомендуем вашему вниманию надежные результаты, полученные использованием показательных бассейнов. Мухин во своем докладе приводит опыт из области аппликации математической теории так называемых обратных задач для требований гидрологического моделирования.

Следующую группу представляют собой доклады по теме стока из запасов снега. Этой проблеме посвятил свой доклад Шимо. Он уделяет внимание прежде всего хотя одной, но очень важной части проблемы, т.е. образованию запасов снега. Результаты могут быть в оперативной практике бесценными, потому что число текущих измерений никогда не достигнет такого качества, чтобы они могли дать надежный образ о значительности запасов снега. Поэтому общие подходы этого сорта будут всегда желаемыми хотя будут в распоряжении информации, приобретенные при помощи снимков из искусственного спутника, как этим занимаются на практике доклады Якуса и другие. Сложной проблемой прогноза в течение современного таяния и дождя занимается доклад Джорджевича,использующий теоретический опыт советской гидрологической школы, что касается таяния снега и экспериментальных американских процессов (коаксальная корреляция и единичный гидрограф).

Выразительно статистический подход к теме прогноза представляет собой доклад Оцоколича, который занимается конечно прогнозами для декады и больше, но это уже почти мимо рамки первой темы.

Методу, который на границе гидрологического и гидравлического моделирования, посвящено выступление Кирнбауера. Доклад иллюстрирует использование известного и внедренного метода Калинин-Милюкова для выражения трансформационной функции системы для решения прогноза течения воды в речном русле.

#### Использование метеорологических информации

Почти во всех докладах, о которых мы уже говорили, предполагается, что при их введении в действие служб прогноза используются информации о метеорологических явлениях как например осадки, температура, испарение и т.п. В общем имеет силу факт, что эффективность прогнозов возможно улучшать прежде всего таким образом, что будут пользоваться в большой степени информацией о причинных метеорологических явлениях, которые дают большую заблаговременность. Некоторые новые возможности в этой сфере назначены в докладах Андерл-Шульц, Якуса и других.

Темой первого доклада является прогноз хода паводка на основе информации об осадках при помощи измерений радара. Этот процесс способен сдать эффективное дополнение к информационным омброметрическим сетям. Цена этого доклада не только в его приведении самостоятельной возможности, о которой мы уже знаем (проект на реке Ды в Великой Британии), но в его конкретном установлении оперативного использования этого подхода.

Доклад Якуса и др. является в определенном смысле позитивным дополнением к подходу, о котором говорит Шимо во своем докладе, хотя они в разных пространственных пониманиях и потому речь идет о другой проблеме.

Якус и др. занимаются использованием информации о запасах снега, приобретенных при помощи искусственных спутников ЕССА-6 и ЕССА-8 для оценки стока. Этим намечается, что из этой самой современной и дорогой техники имеют пользу и небольшие страны. Об актуальности этой проблематики радаровых и спутниковых информации свидетельствует, что на "воркшопе" в Братиславе был предложен доклад (проф.Амороча) к моделировке стока на основе информации из спутников и обработки снимков при помощи электронно-вычислительных машин, включая вычисление хронологического ряда расходов.

#### Роль гидрологических моделей в области прогноза

С дальнейшим развитием других отраслей науки (системного анализа, метеорологии и других) и при развивающейся технике (электронно-вычислительные машины, телекоммуникация, радары и другие) представляются и в гидрологии новые возможности в области прогнозов. Действительным орудием при анализе стокового режима аналогично и в прогнозных методах становятся математические модели; это доказало уже симпозиум в Братиславе.

Несмотря на то, что очевидно будет существовать недостаток затруднений при выборе подходящей модели данной проблемы и при обсуждении параметров разных моделей, мы можем сказать, что математические модели в гидрологии являются перспективным средством для решения многих гидрологических задач. Хотя при "воркшопах" описанного симпозиума подчеркивалась прежде всего универсальность использования многих гидрологических моделей - именно детерминистических - надо закономерно предполагать, что их главным пользователем будут прогнозы. Об этом например говорит и то, что исходными данными в большинстве моделей являются хро-

нологические ряды информации о вычисленных расходах. По этой причине прогностикам бы пришлось иметь в распоряжении подробные информации о развитии в этой области гидрологии и активно влиять на направление дальнейшего процесса этой сферы.

Частой темой соображений о структуре моделей является напр. вопрос, если и когда использовать сложную модель с многими параметрами и с континуальным моделированием закрытого гидрологического цикла и когда опять простую модель с немногими параметрами. Дискутированной проблемой является и вопрос стохастического характера многих гидрологических явлений и детерминистического подхода к моделированию. Следующей темой для дискуссии является также вопрос "гидравлического" и "гидрологического" моделирования - или иначе говоря деленных или целостных систем.

В течение нижеупомянутого симпозиума тоже была константирована диспропорция между развитием за последних 10-15 лет при изучении стока при помощи математических моделей бассейна для гидрологических требований и объемом их использования на практике. Чтобы тот пробел был устранен, это в интересах как теории так и практики. Практика бы таким образом приобрела эффективное средство для выполнения своих задач и теория бы была побуждена новыми знаниями и опытом.

Большое слово в этой сфере могут сказать и знания, приобретенные в течении обсуждения точности прогнозных отношений и моделей. Хорошим примером такого обсуждения служит доклад Крессера-Гуткнехта. Комплексный анализ ошибок и их причин будет всегда средством к улучшению нынешнего состояния, если мы его считаем неблагоприятным.

Средством для повышения эффективности работы гидрологических служб прогноза может служить не только так называемое просто гидрологическое исследование, но и методы, исходящие из экономических и производственных точек зрения и использующие средства оперативного исследования. Примером для того служит доклад Богарди и др. Хотя речь идет о теме до сих пор непроверенной, на конкретных данных следует оценить его новизну в гидрологических прогнозах и поддержать его применение.

#### Заключение

Несмотря на разные натуральные и экономические условия в отдельных придунайских странах существует в многообразных прогнозных методах та же самая тенденция - более интенсивное использование метеорологических информации. Общим резервом для приобретения дальнейшей временной заблаговременности прогноза, которая существует в этой сфере, является использование макросиноптических процессов для оценки дальнейшего развития гидрологической ситуации.

Для ускорения развития методов прогноза кажется выгодным направлять стремление гидрологов так, чтобы в подобных условиях применялись те же модели. Результаты в разных случаях могут сравнением содействовать надежнейшим выводам необходимых исправлений в использовании частичных моделей.

Перед службами гидрологических прогнозов придунайских стран лежат и другие задачи, которым надо уделять внимание - конечно не в связи с моделями. Это вопрос использования новой измерительной и вычислительной техники и телекоммуникаций. Дальнейшее развитие методов прогноза нельзя обеспечить без более тесного сотрудничества с метеорологией - измерения при помощи радара, снимки из спутников, гидросиноптические прогнозы. Большое внимание надо уделять вопросам использования и экономической эффективности прогнозов.

ПРОГНОЗ КОЭФФИЦИЕНТА СТОКА

Барта П.

VORHERSAGE DES ABFLUSSBEIWERTES

Bartha P.

Резюме

Основным вопросом прогноза стока по осадкам является определение потерь. Обширное применение математических моделей в оперативной практике невозможно из-за отсутствия надежного способа решения этого вопроса. Особенно трудной становится эта задача для средних и больших рек и для случая, когда известны только суточные значения количества осадков. В этом случае для определения прогностических зависимостей целесообразно построить временные ряды эффективных осадков. Таким путем были определены зависимости для прогноза стока Верхней Тисы. Ряды эффективных осадков определялись с помощью простой математической модели с концентрированными параметрами. Идентификация параметров была проведена на основе средних за паводок коэффициентов стока. Решением интеграла Диамеля относительно входных данных определялись вероятные значения эффективных осадков. На основе эффективных осадков или рассчитанных по ним суточных значений коэффициента стока выбираются точнее предикторы и определяются прогнозные зависимости.

Zusammenfassung

Das Hauptproblem bei der Abfluvvorhersage aufgrund von Niederschlägen ist die Bestimmung der Verluste. Da es kein zuverlässiges Verfahren zur Lösung dieses Problems gibt, kann man in der Praxis nicht in größerem Umfang mit mathematischen Modellen arbeiten. Besonders schwierig ist diese Aufgabe bei großen und mittelgroßen Flüssen sowie in den Fällen, wo lediglich Niederschlagsmengen-Tageswerte bekannt sind. Dabei werden zur Ermittlung prognostischer Zusammenhänge zweckmäßigerweise zeitliche Reihen der effektiven Niederschläge aufgestellt. Auf diese Art und Weise wurden die Zusammenhänge für die Abfluvvorhersage für die obere Theiß ermittelt. Die Reihen der effektiven Niederschläge wurden mit Hilfe eines einfachen mathematischen Modells mit wenigen Parametern ermittelt.

Die Ermittlung der Parameter erfolgte aufgrund der mittleren Hochwasserabflußverhältnisse. Durch die Bestimmung des Duhamel-Intervalls hinsichtlich der Eingangswerte wurden die effektiven Niederschlagswerte ermittelt. Aufgrund der effektiven Niederschläge bzw. der danach ermittelten Abfluß-Tageswerte lassen sich mit größerer Genauigkeit Vorhersagewerte wählen und prognostische Zusammenhänge ermitteln.

В климатических условиях Центральной Европы в бассейне Дуная образующиеся на большинство реках паводки имеют снего-дождевое или чисто дождевое происхождение. Это является причиной той упорной работы, с которой гидрологи придунайских стран ищут наилучшие практически используемые методы прогнозирования стока рек по осадкам.

Применение методов математической физики для решения этой проблемы связано, с одной стороны, большими затруднениями чисто математического характера, а с другой стороны, сложностью определения параметров окружающей физико-географической среды. Поэтому для моделирования большинства гидрологических процессов, в том числе и для моделирования процессов формирования, используются методы, основанные на теории идентификации.

Возможность установления математической модели некоторой динамической системы на основе данных на входе системы (воздействий) и на выходе системы (реакция) имеет особое значение. Сбор гидрометеорологических данных направлен в первую очередь на получение характеристик осадков и стока рек, т.е. на те данные, которые при рассмотрении задачи моделирования процессов формирования дождевых паводков являются входными и выходными рассматриваемой системы. При применении этого метода для гидрологических задач особое развитие получили линейные модели с сосредоточенными параметрами.

Часть выпавших на водосбор осадков ( $x$ ), теряющаяся на испарении, заполнение бесточных углублений и т.д., образует потери ( $p$ ).

Величину, полученную вычетом потерь из осадков за данный интервал времени, условно называем эффективными осадками. Тогда

$$x - p = x_{eff} \quad [1]$$

Рассматривая водосбор как линейную стационарную динамическую систему, связь между величиной на входе системы ( $x_{eff}$ ) и на ее выходе ( $Q_t$ ) можно записать при помощи условных операторов  $L_1$  и  $L_2$  в виде:

$$L_1(Q) = L_2(x_{eff}) \quad [2]$$

где:

$$L_1 = a_n \frac{d^n}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 \quad [3]$$

$$L_2 = b_n \frac{d^n}{dt^n} + b_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + b_0$$

Если  $a_i$  и  $b_i$  постоянные, то решение системы уравнений при нулевых начальных условиях можно представить в виде интеграла Дюамеля [1]:

$$Q(t) = \int_0^t p(t-\tau) x_{eff}(\tau) d\tau \quad [4]$$

Функцию  $P(t)$  в выражении называют переходной функцией, кривой добегаания или мгновенным единичным гидрографом. Определению этой функции в последние годы было уделено особое внимание со стороны исследователей. Однако, применение математических моделей для прогноза стока рек и особенно для больших рек с бассейном в несколько десятков тысяч квадратных километров все еще связано с большими затруднениями. Это положение объясняется тем, что пока для определения кривой добегаания существуют несколько различных методов; определению функции  $x_{eff}(t)$  не уделяли достаточного внимания.

В самом простом случае для идентификации параметров кривой добегаания и для расчета паводков эффективные осадки можно определить с помощью объемного коэффициента стока.

$$x_{i,eff} = x_i \alpha \quad [5]$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^{i=k_2} q_i}{\sum_{i=1}^{i=k_1} x_i} \quad [6]$$

Для применения в прогнозах этих зависимостей нужно предсказать значения  $\alpha$  по известным предикторам. Такими предикторами могут быть предпаводочный расход, индекс предшествующего увлажнения и т.д.

При этом возникает вопрос: правильно ли связать, например, индекс предшествующего увлажне-

ния, рассчитанного для определенной даты, с коэффициентом, характеризующим условия формирования стока за весь паводок, не нужно ли связать его с коэффициентом стока, характеризующим условия формирования стока только для данного интервала времени. При расчетном интервале одни сутки этот коэффициент можно назвать суточным коэффициентом стока. Для определения такого коэффициента имеются два пути: Выбрав такие паводки, которые были вызваны дождем, выпавшим в течении расчетного интервала времени (сутки), для них объемный коэффициент стока будет совпадать с суточным коэффициентом стока. Для больших рек этот метод обычно нельзя применять, потому что паводки образуются под влиянием осадков, выпавших в течении нескольких суток.

В таких случаях можно определить эффективные осадки или интенсивность дождя, снеготаяния из самой модели, как на это указывается в работах (1, 2).

Решение интеграла Дюамеля относительно входной функции, однако, является очень трудной задачей. Наилучшие результаты можно получить применением аналоговых машин, решая задачи методом подбора. Опыт показывает, что для определения входной функции достаточно 4-5 расчетов.

Таким путем были получены ряды эффективных осадков для бассейна реки Тисы для створа Тисабеч для 50 паводков. Площадь водосбора составляет 970 км<sup>2</sup>. По полученным эффективным осадкам определялись суточные значения коэффициента стока:

$$\alpha_i = \frac{x_{i,eff}}{x_i} \quad [7]$$

Получив ряды коэффициентов стока, отыскивались предикторы для его прогноза. Естественно, для формирования потерь самое большое значение имеет увлажненность верхнего слоя почвы в момент выпадения осадков. Не располагая какими-нибудь данными относительно влажности почвы, для ее характеристики можно применять индексы предшествующего увлажнения (PI). Эти индексы являются суммой предшествующих осадков, умноженные на уменьшающиеся весовые коэффициенты. Рассчитав суточные коэффициенты стока для 50 паводков в створе Тисабеч, имели возможность исследовать интервал, рассчитанный за который индекс предшествующего увлажнения показывает наиболее тесную связь. Для этого были рассчитаны индексы за 5 суток (PI<sub>5</sub>) за 10 суток (PI<sub>10</sub>), за 20 суток (PI<sub>20</sub>) и за 40 суток (PI<sub>40</sub>).

Весовые коэффициенты соответственно уменьшались в течении расчетного интервала от 1 до 0. Результат сопоставлений изображен на рис.1. Видно, что наиболее тесная связь наблюдается между значениями  $\alpha_i$  и PI<sub>20,i-1</sub> и достаточно тесная связь между значениями  $\alpha_i$  и PI<sub>10,i-1</sub>.

Поскольку значение PI<sub>20,i-1</sub> рассчитанно за предыдущие сутки, эта зависимость пригодна и для прогноза коэффициента стока.

Анализируя связь хода коэффициента стока и индекса предшествующего увлажнения (PI<sub>20</sub>), можно отметить, что ход коэффициента стока в многих случаях аналогичен ходу предшествующего увлажнения. В условиях бассейна Тисы до створа Тисабеч значительные паводки образуются в результате циклонической деятельности, связанной выпадением осадков в течении 3-5 суток. В течение этого процесса обычно наблюдается один день с максимальными осадками, которым предшествуют 1-2 дня с меньшим количеством осадков. В течении этого периода относительные потери уменьшаются изо дня в день, хотя в некоторых случаях в конце периода наблюдается уменьшение коэффициента стока (рис.2, 3, 4).

Такой ход коэффициента стока для однопиковых паводков объясняет тесную связь объемного коэффициента стока с суточным коэффициентом, рассчитанного для времени (сутки) с максимальным выпадением осадков.

дением осадков (рис.5). Это доказывает, что применение объемного коэффициента для характеристики условий потерь допустимо и тогда, если речь идет о расчете и прогноза максимума паводка. В расчетах всего гидрографа ветвь подъема будет занижена, а ветвь спада завышена. Поэтому в этих случаях и при сплошном ходе осадков для прогноза стока нужно предсказать потери за каждый расчетный интервал времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучмент Л.С.
2. Okunishi K.
3. Барта П.

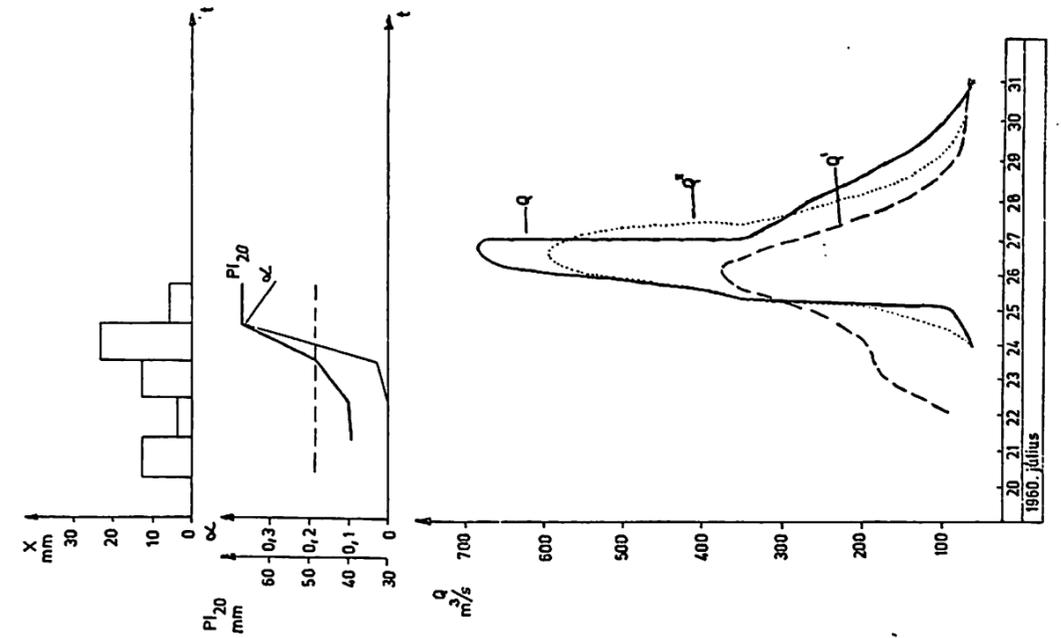
Математическое моделирование речного стока.  
Гидрометеониздат, Ленинград, 1972 г.

Inverse transform of Duhamel integral for  
data processing in hydrology.  
Bull. Disast. Prev. Res. Inst. Kyoto

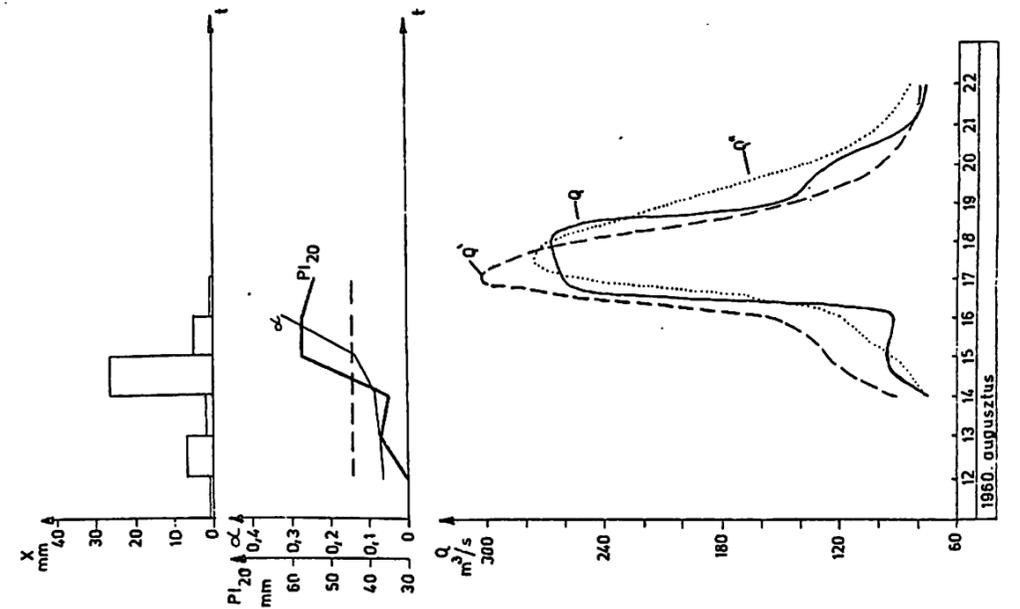
Анализ и прогноз стока рек по осадкам.

Международный семинар по применению математических и статистических моделей в гидрологических расчетах и прогнозах.  
Ленинград, ноябрь 1974 г.

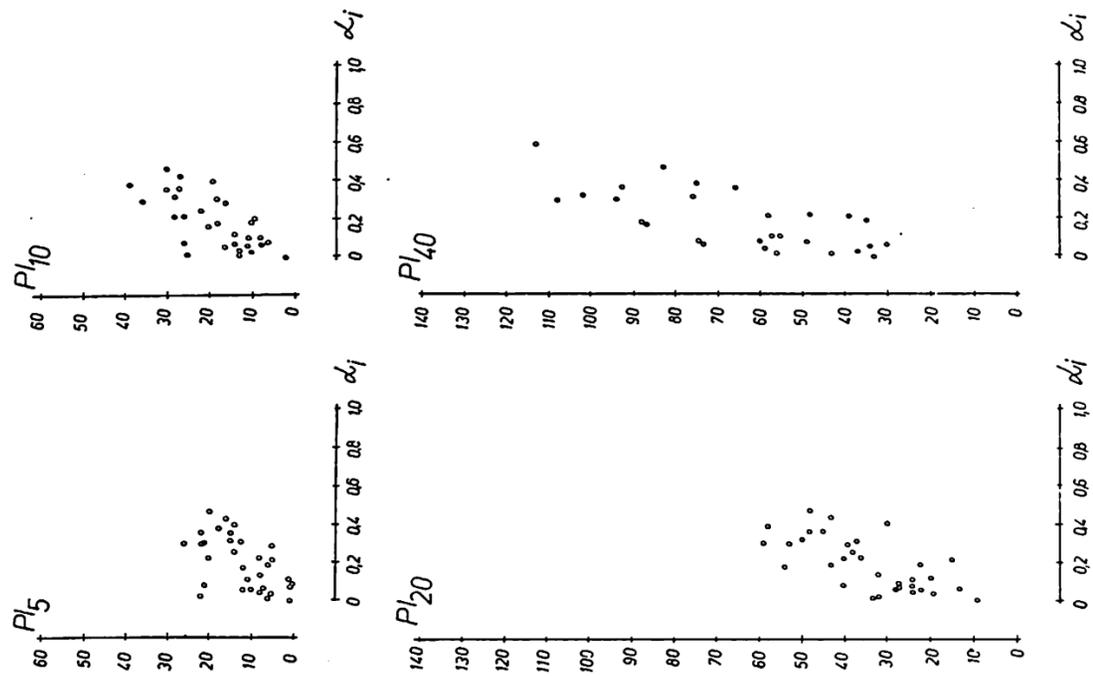
2.



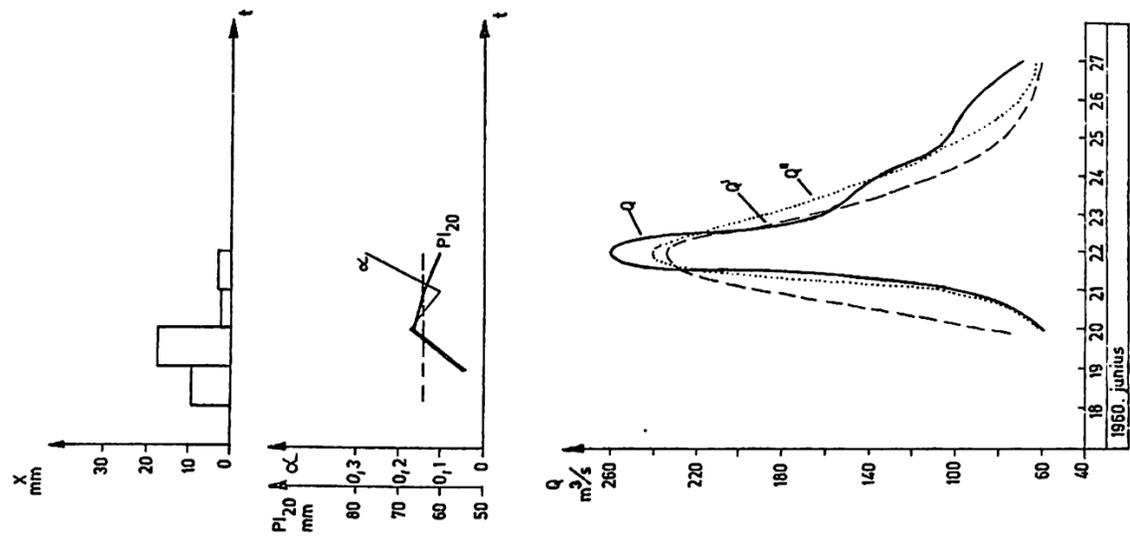
1.



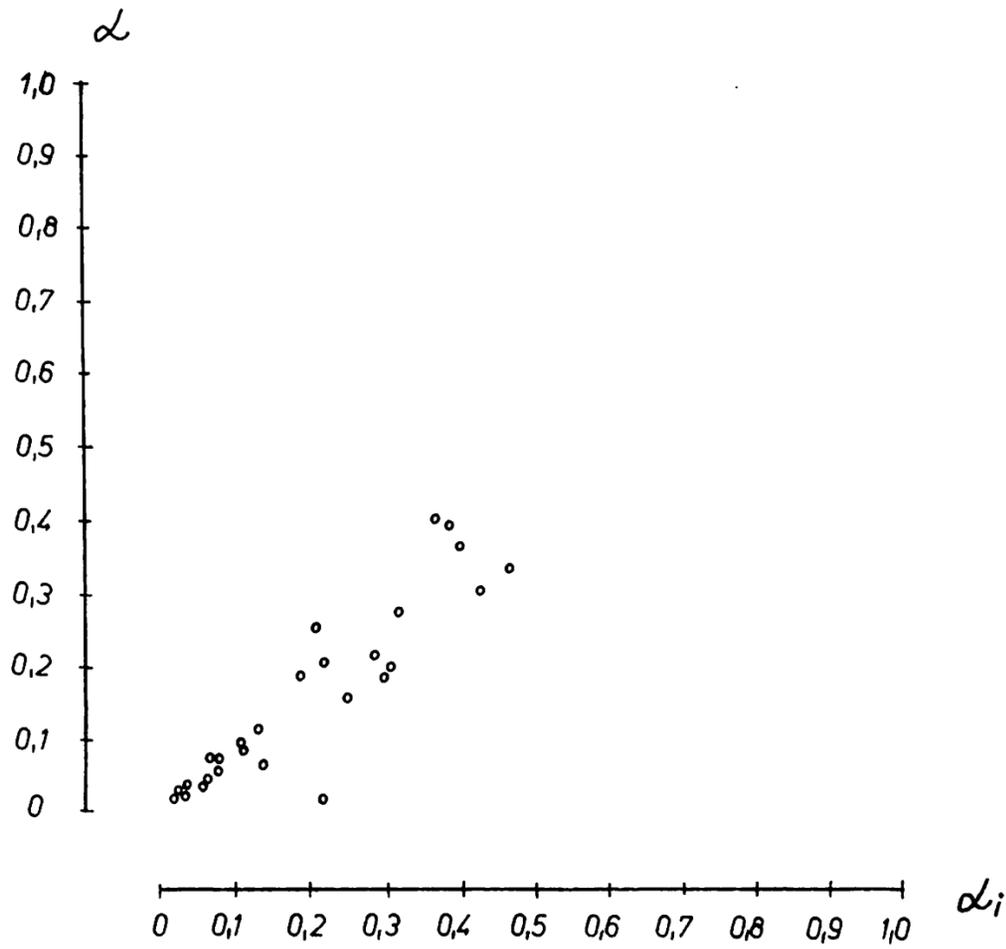
4.



3.



5.



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ  
ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ОПЕРАТИВНЫХ СХЕМ  
ПРОГНОЗОВ

В.А. Бельчиков

ANWENDUNG EINES MATHEMATISCHEN MODELLS BEI DER  
ERSTELLUNG VON REGENHOCHWASSERVORHERSAGEN

W.A. Beľčikov

Резюме

Рассматриваются особенности применения математической модели формирования дождевых паводков В.И.Корня и Л.С.Кучмента при построении оптимальных моделей, учитывающих условия формирования стока на конкретных водосборах и имеющиеся данные наблюдений. Основное внимание уделяется определению параметров моделей. Для этой цели используется методика оптимизации с последовательным усложнением модели.

На примере данных наблюдений по некоторым горным рекам иллюстрируются возможности использования полученных оптимальных моделей при составлении оперативных прогнозов дождевых паводков. Рассматриваются возможности текущей корректировки с учетом поступающей информации об осадках и расходах воды.

Zusammenfassung

Vorliegender Bericht untersucht die Besonderheiten der Anwendung einer von W.I.Koren und L.S.Kuĉment erarbeiteten Konzeption eines mathematischen Hochwassermodelles bei der Erstellung von optimalen Modellen, die die Abflußverhältnisse und die vorhandenen Beobachtungsdaten im konkreten Einzugsgebiet berücksichtigen. Die größte Aufmerksamkeit wird der Ermittlung der Parameter für die Modelle gewidmet. Hierfür wird eine Methode der Optimierung mit nachfolgender Verfeinerung des Modells angewandt.

Am Beispiel von Meßdaten für einige Gebirgsflüsse wird die Möglichkeit einer praktischen Anwendung der ermittelten optimalen Modelle bei der Regenhochwasservorhersage aufgezeigt. Es wird die Möglichkeit einer laufenden Korrektur unter Berücksichtigung der einlaufenden Informationen über Niederschläge und Abflusmengen untersucht.

В последние годы математическое моделирование, пройдя стадию изучения и описания процессов формирования стока на водосборе, стало внедряться в практику гидрологического прогнозирования.

Основные трудности, связанные с практической реализацией математических моделей, возникают в основном, при решении следующих задач:

1. Получение оптимальной модели для конкретного водосбора и определение параметров при данной точности и полноте исходной информации.
2. Выбор репрезентативных данных наблюдений для идентификации модели.
3. Учет начальных условий и корректировка параметров при выпуске краткосрочных прогнозов.

Следует отметить, что трудности решения перечисленных задач во многом зависят от качества принятой в основу общей структуры модели.

В Гидрометцентре СССР для разработки оперативных схем краткосрочных прогнозов дождевых паводков в течение ряда лет используется математическая модель, предложенная В.И.Корнем

и Л.С.Кучментом (1,2,4). Эта модель, полученная с помощью теоретико-вероятностного осреднения по площади процессов, происходящих на элементарной площадке, учитывает основные закономерности формирования стока и позволяет с достаточной надежностью определять необходимые для расчета параметры применительно к конкретным водосборам.

Входными функциями модели являются интенсивность осадков, дефицит влажности воздуха и скорость ветра, а выходной функцией - гидрограф дождевого паводка в замыкающем створе. Модель включает описание процессов испарения, инфильтрации, поверхностного, внутрипочвенного стоков, а также трансформации паводочной волны при ее движении. Не останавливаясь на методологии получения этой модели, приведем основные расчетные соотношения в предположении, что все входные функции изменяются только во времени.

**Испарение.** Предполагая, что испарение с увлажненной однородной почвы равно испарению с водной поверхности, а распределение относительных площадей с различными значениями максимальной влагоемкости описывается экспоненциальной зависимостью, интенсивность испарения рассчитывается по соотношению

$$E(t) = K_1 + K_2 U(t) D(t) e^{-\frac{d(t)}{W_m}} \quad [1]$$

где  $D(t)$  - дефицит влажности воздуха;  $U(t)$  - скорость ветра;  $d(t)$  - дефицит влажности почвы;  $W_m$  - максимальная влагоемкость почвы;  $k_1, k_2$  - эмпирические параметры.

Дефицит влажности почвы рассчитывается по соотношению

$$d(t) = \int_0^t [E(\tau) + i_0 e^{-\frac{d(\tau)}{W_m}} + Q(\tau) - P(\tau)] d\tau \quad [2]$$

где  $Q(t)$  - расходы воды;  $P(t)$  - интенсивность осадков;  $i_0$  - интенсивность фильтрации.

**Инфильтрация.** Интенсивность инфильтрации принимается пропорциональной дефициту влажности почвы:

$$J(t) = \begin{cases} \frac{d(t)}{K_3} + i_0 & \text{при } P(t) - E(t) > J(t) \\ P(t) - E(t) & \text{при } P(t) - E(t) \leq J(t) \end{cases} \quad [3]$$

где  $K_3$  - эмпирический параметр.

**Поверхностный сток.** Поверхностный сток, с учетом действующей площади (5), рассчитывается по соотношению

$$q_s(t) = [P(t) - E(t) - J(t)] \eta \left( 1 - e^{-m \int_0^t [P(\tau) - E(\tau) - J(\tau)] d\tau} \right) \quad [4]$$

где  $\eta$  - параметр, учитывающий величину бессточной площади;  $m$  - параметр, характеризующий изменение действующей площади водосбора в зависимости от сформировавшегося слоя воды на водосборе.

**Внутрипочвенный сток.** Предполагается, что величина внутрипочвенного стока зависит, главным образом, от коэффициента фильтрации и наличия влаги в почве. Исходя из этого, для расчета внутрипочвенного стока принимается следующая зависимость:

$$q_j(t) = i_0 e^{-\frac{K_5 d(t)}{W_m}} \quad [5]$$

где  $K_5$  - эмпирический параметр.

**Трансформация гидрографов.** Для расчета гидрографа стока в замыкающем створе используется линейная модель трансформации поверхностного и внутрипочвенного стока

$$Q(t) = \int_0^t q_s(\tau) p_1(t-\tau) d\tau + \int_0^t q_j(\tau) p_2(t-\tau) d\tau \quad [6]$$

где  $p_1(t), p_2(t)$  - соответственно функция влияния поверхностного и внутрипочвенного стока.

Для аппроксимации функции влияния используется двухпараметрическое гамма-распределение (3)

$$P_i(t) = \frac{1}{\tau_i \Gamma(n_i)} \left( \frac{t}{\tau_i} \right)^{n_i-1} e^{-\frac{t}{\tau_i}}, \quad (i=1,2) \quad [7]$$

где  $\tau_i, n_i$  - эмпирические параметры.

Опыт использования модели на ряде водосборов, отличающихся как физико-географическими условиями, так и площадями, показал, что рассматриваемая модель является весьма общей и позволяет с удовлетворительной точностью производить расчет гидрографов дождевых паводков по осадкам.

Однако из-за большого разнообразия формирования стока в разных физико-географических зонах процессы, существенные для одного водосбора, часто оказываются несущественными для другого. Поэтому для каждого конкретного водосбора необходимо выбирать оптимальную модель (в смысле точности определения параметров и описания основных процессов на водосборе).

Выбор оптимальной модели для конкретного водосбора требует индивидуального подхода и должен опираться на результаты анализа физико-географических и почвенных особенностей водосбора. В результате такого анализа из общей модели можно заведомо исключить процессы, практически не оказывающие влияния на формирование паводков, а в некоторых случаях ввести изменения в описание отдельных элементарных процессов для разных физико-географических зон.

Выбранная таким путем структура модели может все же оказаться не оптимальной в смысле точности определения параметров. Точность определения параметров модели зависит от точности, репрезентативности и объема исходной информации. Для каждого водосбора качество и количество информации меняется в широких пределах. Поэтому для получения оптимальной модели использовался принцип последовательного усложнения модели, заключающийся в следующем.

Сначала на основе предварительного физического анализа и априорной информации выбираются основные процессы, затем структура модели постепенно усложняется. Усложнение осуществляется путем подключения новых факторов и элементарных процессов. Для каждой частной модели определяются параметры и производится сравнение фактических и вычисленных гидрографов как по паводкам, которые использовались для определения параметров, так и для контрольных паводков. Усложнение продолжается до тех пор, пока наблюдается заметное улучшение расчетов по обеим выборкам.

Порядок усложнения модели зависит от имеющейся информации о значимости отдельных факторов и основных процессов в условиях конкретного водосбора. Практически можно рекомендовать производить усложнение модели следующим образом.

1. Считается, что водоотдача линейно связана с осадками посредством коэффициента стока, то есть вместо соотношения [4] принимается

$$q_s(t) = P(t)\eta \quad [8]$$

Расчет трансформации ведется по соотношению [6]. Остальные процессы исключаются. Модель включает три параметра:  $\eta$ ,  $\tau_1$ ,  $n_1$ .

2. Учитывается изменение действующей площади

$$q_s(t) = P(t)\eta \left( 1 - e^{-m \int_0^t P(\tau) d\tau} \right) \quad [9]$$

Модель включает четыре параметра:  $\eta$ ,  $m$ ,  $\tau_1$ ,  $n_1$ .

3. Учитываются инфильтрация и испарение с поверхности водосбора, рассчитываемые по зависимостям [1] - [3]. Для расчета поверхностного стока используется соотношение [4]. Число параметров в этой модели, в зависимости от входных данных, может меняться от семи до девяти:  $\eta$ ,  $m$ ,  $W_m$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $i_0$ ,  $\tau_1$ ,  $n_1$ .

4. В результате учета внутриводосборного стока приходим к общей модели (соотношения [1] - [7]), включающей двенадцать параметров:  $\eta$ ,  $m$ ,  $W_m$ ,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $i_0$ ,  $\tau_1$ ,  $n_1$ ,  $K_5$ ,  $\tau_2$ ,  $n_2$ .

Правильно выбранная структура модели в значительной степени обеспечивает надежность расчетов. Однако основные трудности при построении практических моделей формирования дождевых паводков методами идентификации заключаются не в выборе их структуры, а в обеспечении достаточной точности определения параметров.

Эмпирические параметры, входящие в соотношения [1] - [7], являются некоторыми интегральными характеристиками водосбора, для определения которых необходимо использовать имеющуюся информацию за прошедшие годы о входных (осадки, дефицит влажности воздуха и скорость ветра) и выходных (гидрограф в замыкающем створе) функциях. Как показал опыт, наиболее подходящим аппаратом для определения параметров сложных моделей стока являются методы оптимизации, среди которых лучше всего зарекомендовали себя метод сопряженных градиентов и несколько модифицированный алгоритм Розенброка. Для получения устойчивых и надежных параметров этими методами требуется дополнительная информация об отдельных величинах и элементарных процессах, позволяющая хорошо задать начальные значения параметров и установить возможные пределы их измерений. Численные значения параметров в большой мере зависят от принятого при оптимизации критерия качества, характеризующего точность расчета гидрографа. Чаще всего для оценки точности расчета гидрографа используется следующий критерий качества:

$$K = \sum_{i=1}^n \int_0^t [Q_{\phi i}(t) - Q_{p i}(t)]^2 dt \quad [10]$$

где  $Q_{\phi i}$ ,  $Q_{p i}$  - фактические и рассчитанные расходы воды;  $n$  - число паводков, одновременно включенных в оптимизацию;  $T_i$  - длина  $i$ -го паводка.

При определении параметров модели и проверке их устойчивости большую роль играет подбор паводков. Исследования показали, что предпочтительнее оптимизацию параметров вести по нескольким паводкам одновременно. При оптимизации по каждому паводку отдельно и последующем осреднении параметров, полученных для нескольких паводков, не удастся надежно определить все параметры модели, так как отдельные параметры могут принимать случайные значения из-за слабого влияния какого-либо элементарного процесса на формирование данного паводка. Поэтому при определении параметров необходимо использовать одновременно несколько паводков.

В силу ограниченной памяти и скорости вычислительных машин число и объем паводков, одновременно включаемых в оптимизацию, жестко регламентированы. Поэтому в их число должны войти паводки с большим разнообразием условий формирования стока и охватывающие всю амплитуду изменения расходов воды. Для большей надежности желательно несколько раз изменить

состав групп паводков, используемых для оптимизации и контроля. Такая процедура позволяет с большей уверенностью исключать паводки с наиболее грубыми ошибками.

По рассмотренной методике были получены оптимальные модели формирования дождевых паводков для горных рек Риони (площадь водосбора 13 300 км<sup>2</sup>) и Ингоды (площадь водосбора 12 500 км<sup>2</sup>).

Основными исходными материалами для разработки оптимальных моделей послужили данные о расходах воды, осадках и дефиците влажности воздуха (скорость ветра в данном случае не учитывалась). Расчетный интервал времени был принят равным 12 ч.

Учитывая особенности формирования стока в бассейне р. Ингоды, заключающиеся в том, что на сток в данном бассейне большое влияние оказывают многолетняя мерзлота и начальный запас влаги на водосборе, в формулу для расчета поверхностного стока были внесены небольшие изменения, то есть вместо соотношения [4] принята следующая зависимость:

$$q_s(t) = [P(t) - E(t) - J(t)]\eta \left( 1 - e^{-\frac{m-W_0}{t}} \right) \quad [11]$$

где  $W$  - слой стока за половодье, характеризующий запас влаги на водосборе;  $t$  - время, отсчитываемое от максимума половодья;  $m$  - эмпирический параметр.

Оптимизация параметров велась для последовательно усложняющихся моделей. В таблице 1 приведены полученные в результате оптимизации с последовательным усложнением схемы расчета оптимальные значения параметров для рек Риони и Ингоды.

Таблица 1.

Оптимальные параметры моделей формирования дождевых паводков рек Риони и Ингоды.

Река - пункт	Параметры										
	$\tau_1$ сутки	$n_1$	$\eta$	$m$ мм <sup>-1</sup>	$W_m$ мм	$K_3$ сутки	$K_1$ мм сутки-мм	$i_0$ мм сутки	$K_5$	$\tau_2$ сутки	$n_2$
Риони-с. Сакочакидзе	1,36	1,0	0,42	-	63,5	10,9	0,88	3,32	0,14	0,23	1,43
Ингода-с. Улеты	1,04	2,0	0,82	4,03	18,6	5,4	0,74	1,52	0,16	2,03	4,74

Анализ величин испарения, инфильтрации, времени добега стока до замыкающего створа (рис. 1) дает основание считать, что параметры определены с достаточной степенью надежности и не противоречат нашим представлениям о характере протекающих в бассейнах процессов. Доказательством надежности и устойчивости параметров моделей является также то, что точность расчетов для проверочных паводков примерно такая же, как точность расчетов для паводков, по которым велась оптимизация, являются репрезентативными и полученные параметры можно принять в качестве констант оперативных моделей краткосрочных прогнозов дождевого стока для рассматриваемых бассейнов.

При использовании математических моделей стока для выпуска краткосрочных прогнозов дождевых паводков значительное увеличение точности может быть достигнуто в результате учета начальных условий и корректировки некоторых параметров. Без такого уточнения краткосроч-

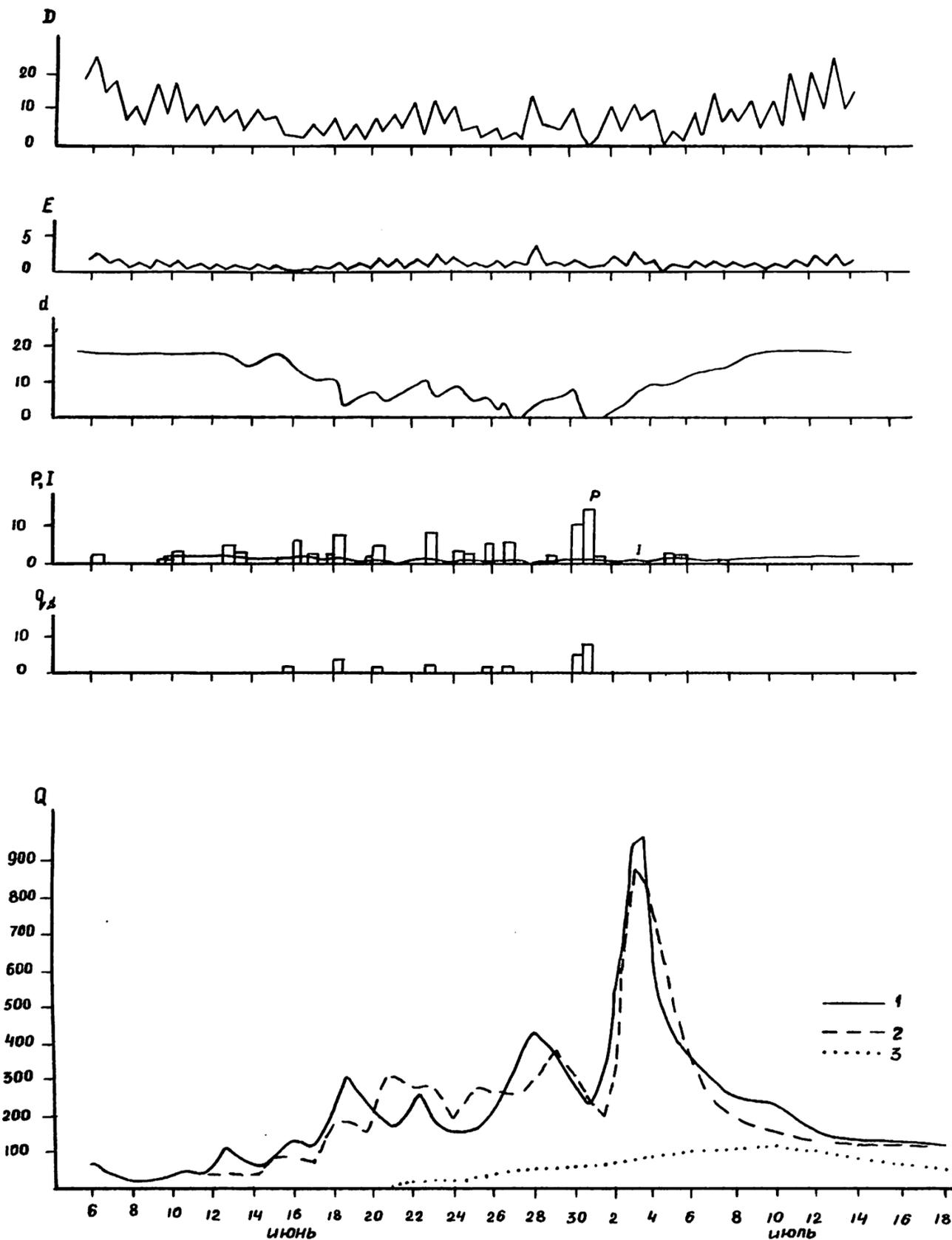


Рис.1 Совмещенный график хода фактических (1) и вычисленных (2) расходов воды (Q), внутрипочвенного стока (3), осадков (P), инфильтрации (I), водоотдачи (Q<sub>s</sub>), дефицита влажности почвы (d), испарения (E) и дефицита влажности воздуха (D), р.Ингода - с.Улеты, 1955 г.

ные прогнозы, несмотря на хорошую точность расчета гидрографа, часто оказываются неэффективными. В рассмотренной модели начальные условия можно учесть с помощью следующей зависимости:

$$Q(t) = \int_0^t p(t-\tau)q(\tau)d\tau + \sum_{i=1}^{n_1} c_i \frac{1}{\Gamma(i)} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{i-1} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [12]$$

где  $p(t)$  - функция влияния с параметрами  $\tau_1$  и  $n_1$ ;  $c_i$  - постоянные интегрирования, определяемые из [12] при наличии измеренных расходов за  $n_1$  единиц времени до даты выпуска прогноза.

Согласно зависимости [12] начальные условия учитываются только для поверхностной составляющей, так как величина и изменчивость внутрипочвенного стока значительно меньше по сравнению с поверхностным стоком.

Такой учет начальных условий обычно существенно улучшает точность прогноза гидрографа с небольшой заблаговременностью. Однако эффективность уточнения при этом сильно зависит от формы функции влияния. При больших значениях  $n_1$  (больше 3-4) такой подход может оказаться неэффективным из-за неустойчивости решения. Использование регуляризирующих алгоритмов в этих случаях дает существенное улучшение лишь при сравнительно плавном изменении расходов воды.

Иногда более целесообразным является огрубление трансформации путем введения чистого сдвига и уменьшения параметра  $n_1$ . Такой прием нередко позволяет увеличить заблаговременность прогноза без существенной потери точности.

На рис.2 показаны сравнительные гидрографы для р. Ингоды, полученные в результате прогноза на 1,5 суток с учетом и без учета начальных условий при введении сдвига, равного трем единицам времени, и с  $n_1=2$ . На этом рисунке видно, что учет начальных условий дает заметное улучшение прогноза.

Задача учета начальных условий значительно упрощается, если при расчете трансформации ввести чистый сдвиг и значение  $n_1$  принять равным единице. В этом случае для прогноза с начальными условиями используется зависимость

$$Q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \int_0^t \frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t-\tau}{\tau_1}} q(\tau) d\tau \quad [13]$$

где  $Q_0$  - расход воды в день выпуска прогноза.

Как следует из этой зависимости, для выпуска прогноза с учетом начальных условий требуются данные о расходе воды в день выпуска прогноза и две ординаты графика водоотдачи: в день выпуска прогноза и за предыдущий день. На рис.3 приведен гидрограф для р. Риони, полученный в результате прогноза на одни сутки с учетом начальных условий при введении сдвига, равного двум единицам времени, и с  $n_1=1$ .

В заключение отметим, что разработанная схема краткосрочного прогноза дождевых паводков для р. Риони (2) используется в оперативной практике и дает вполне удовлетворительные результаты.

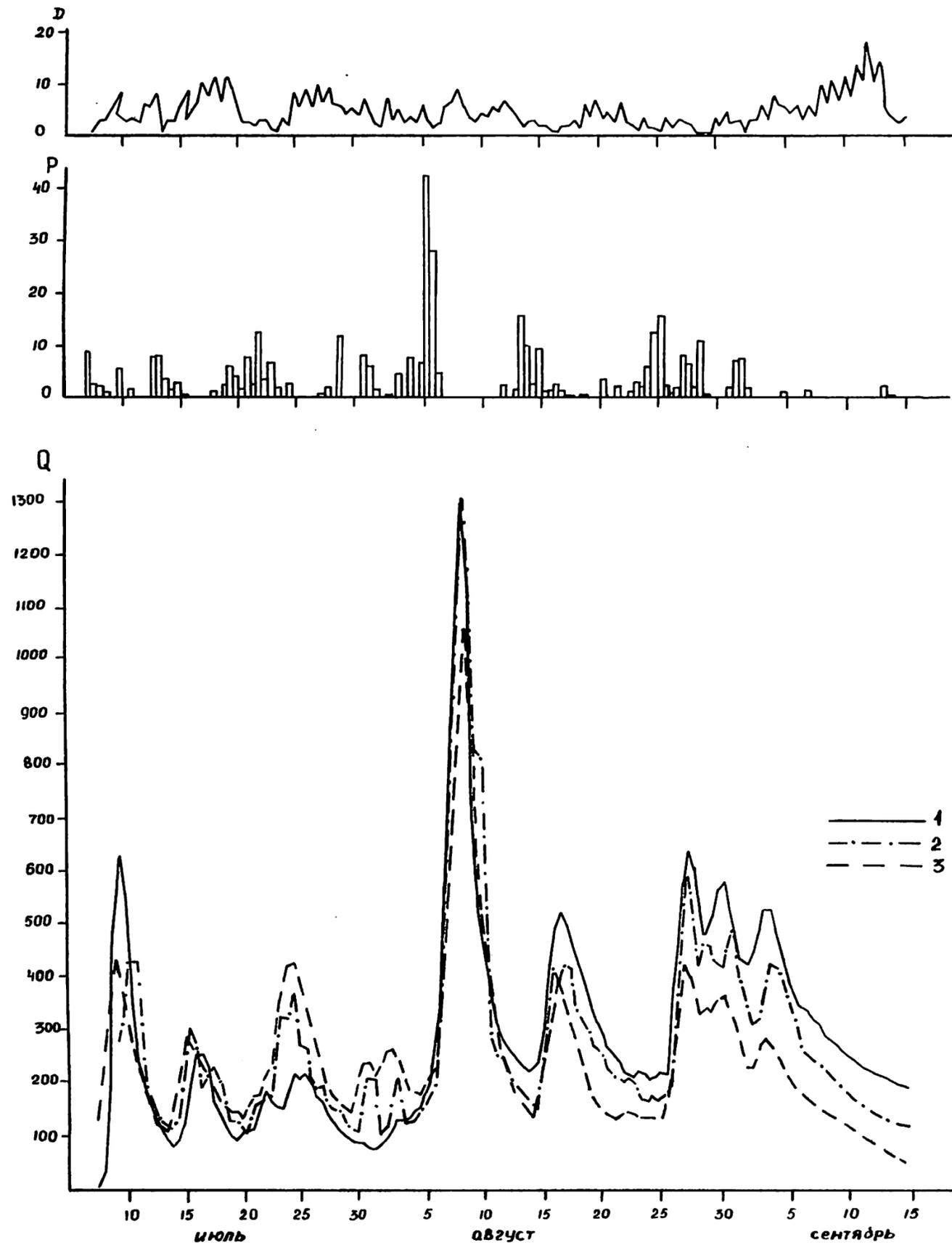


Рис. 2 Сопоставление фактического (1) и прогнозируемых гидрографов дождевого стока с учетом (2) и без учета (3) начальных условий, р.Ингода - с.Улеты, 1969 г.

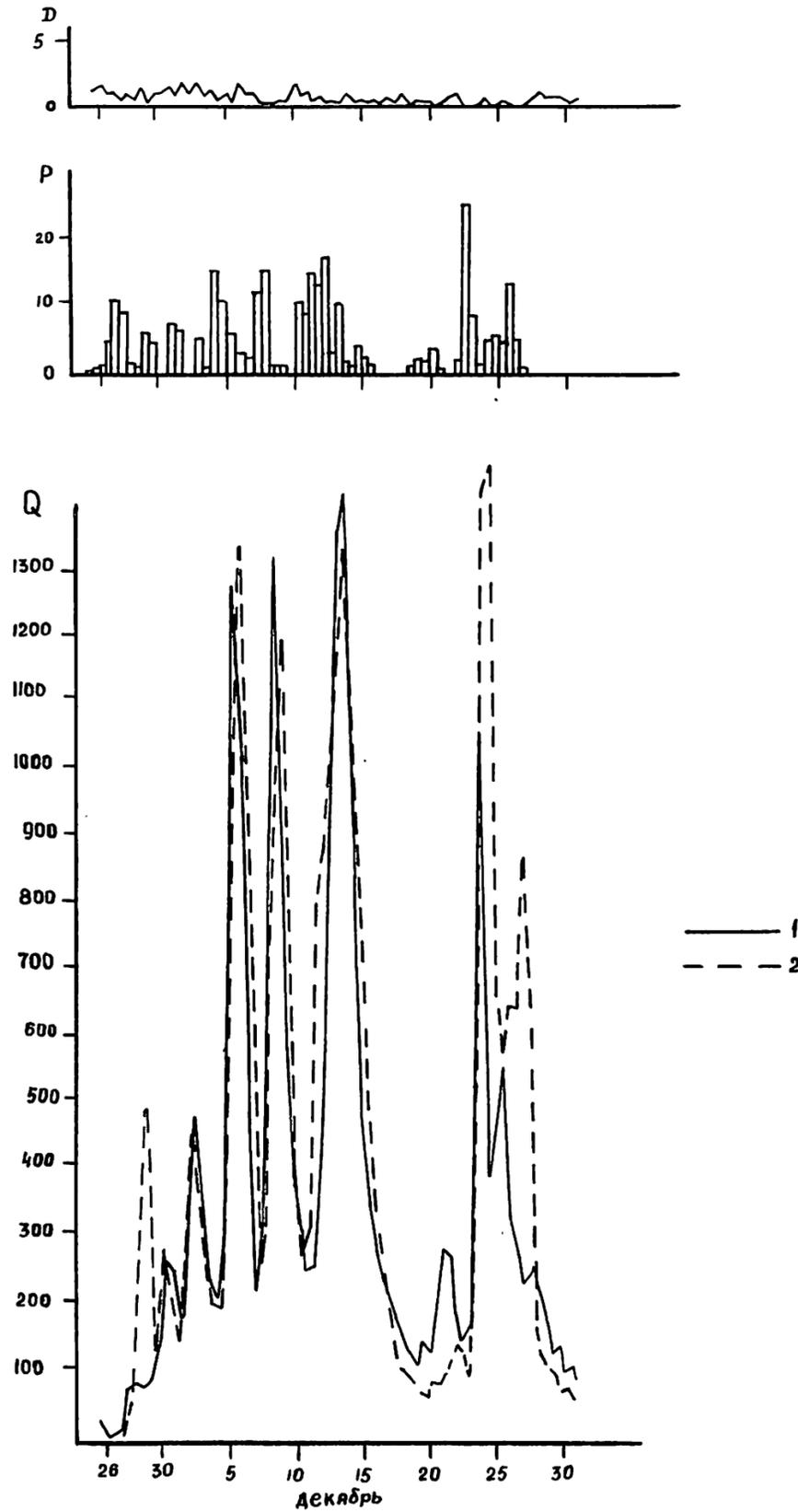


Рис. 3 Сопоставление фактического (1) и прогнозируемого (2) гидрографов дождевого стока, р.Риони - с.Сакочакидзе, 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бельчиков В.А., Корень В.И., Кучмент Л.С. Математическое моделирование процессов формирования стока на водосборе. Труды ГМЦ, вып. 81, 1972.
2. Бельчиков В.А. Модель формирования дождевых паводков в бассейне р. Риони и использование ее для краткосрочных прогнозов. Труды ГМЦ, вып. 131, 1974.
3. Калинин Г.П., Милюков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс. Гидрометеиздат, Л., 1958.
4. Корень В.И., Кучмент Л.С. Математическая модель формирования дождевых паводков, оптимизация ее параметров и использование в гидрологических прогнозах. Метеорология и гидрология №11, 1971.
5. Попов Е.Г. Вопросы теории и практики прогнозов речного стока. Гидрометеиздат, Л., 1963.

UNTERSUCHUNG OBER DIE ENTSTEHUNG UND DAS AUSMASS VON FEHLERN BEIM AUFBAU EINES  
NIEDERSCHLAG-ABFLUSS-MODELLS FÜR ZWECHE DER HOCHWASSERVORHERSAGE

W. Kresser und D. Gutknecht

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И РАЗМЕР НЕТОЧНОСТЕЙ ПРИ СОЗДАНИИ МОДЕЛИ  
ОСАДКОВ И СТОКОВ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ПАВОДОЧНЫХ ПРОГНОЗОВ

В. Крессер и Д. Гуткнехт

Zusammenfassung:

In der vorliegenden Arbeit wird versucht, die bei Anwendung eines Niederschlag-Abfluß-Modells auf die kurzfristige Vorhersage von Hochwässern entstehenden Fehler auf ihre Ursache hin zu untersuchen. Als Beispiel dient ein Verfahren zur Vorhersage von Hochwässern für das Kraftwerk KLAUS an der Steyr, das auf dem Unit Hydrograph- sowie auf dem API-Konzept beruht.

Wie die Analyse der Fehler ergab, wirkt sich neben fehlerhaften und unzureichenden Beobachtungsdaten vor allem die Berechnung des Abflußanteils des Regens nach dem API-Konzept ("Koaxial-Diagramm") ungünstig auf die Güte des Verfahrens aus. Die entstehenden Fehler sind bis zu einem gewissen Grad voneinander abhängig. Durch Einführung eines einfachen Korrekturgliedes, das mit dem Fehler bei der letzten Abflußprognose identisch ist, läßt sich eine merklich höhere Genauigkeit erzielen.

Die Möglichkeit von Vorhersagen über mehrere Stunden hängt weitgehend von der Entwicklung einer entsprechenden Niederschlagsprognose ab. Erste Verbesserungen in dieser Richtung konnten durch die Einführung einfacher Ergänzungsglieder erzielt werden, die auf der Annahme einer 1- bzw. 2-stündigen Fortdauer des während der letzten Stunde beobachteten Regens basieren.

Резюме:

В настоящей работе делается попытка исследовать причины появления неточностей при применении модели осадков и расходов воды в целях краткосрочного прогностирования паводков. Примером служит метод прогностирования паводков для силовой станции КЛАУС на реке Штейр, основывающийся на концепте Unit Hydrograph, а также на концепте API.

Как показал анализ неточностей, помимо ошибочных и недостаточных гидрометрических данных, на качество метода неблагоприятно сказывается, прежде всего, расчет доли стока дождевой воды по концепту - API ("коаксиальная диаграмма"). Возникающие ошибки до определенной степени зависят друг от друга. При помощи введения, равнозначного с неточностью последнего прогноза стока, корректурного члена, возможно достижение явной более высокой точности.

Возможность составления прогнозов на несколько часов в большей мере зависит от разработки соответствующего прогноза осадков. Первые усовершенствования в этом направлении были произведены с введением простых членов дополнения, базирующихся на одно- или двух- часовой продолжительности, наблюдаемого в течении последнего часа, дождя.

1. Einleitung

Die bei kleinen Einzugsgebieten vorherrschenden Verhältnisse erfordern im allgemeinen ein Verfahren zur Hochwasservorhersage, das auf Niederschlagsdaten aufbaut. Den Kern eines solchen Verfahrens bildet aus diesem Grund in der Regel ein Niederschlag-Abfluß-Modell, bei dessen Entwicklung eine große Zahl von Parametern anhand von Naturbeobachtungen zu eichen ist. Diesem Eichvorgang liegt üblicherweise ein bestimmtes Kriterium (-z.B. Minimum der Fehlerquadratsumme- etc.) zugrunde, das in einer ganz bestimmten Weise eine "optimale" Anpassung ermöglicht. Im Rahmen einer solchen Anpassung ist es dabei unvermeidlich, daß gewisse Fehler entstehen und das Modell die wirklichen Verhältnisse nicht vollkommen widerspiegelt.

Für die Beurteilung eines Niederschlag-Abfluß-Modells hinsichtlich seiner Anwendbarkeit unter bestimmten Voraussetzungen ist die Erkenntnis wichtig, auf welche Weise Fehler in das Modell eingetragen werden bzw. in welchem Ausmaß die mangelhafte Eichung einzelner Modellteile zur Größe des Gesamtfehlers beiträgt.

Mit der vorliegenden Arbeit soll der Versuch unternommen werden, an einem konkreten Beispiel die Fehlerentwicklung beim Aufbau eines Niederschlag-Abfluß-Modells zu verfolgen. Bei dem Beispiel handelt es sich um ein Verfahren zur Vorhersage von Hochwässern für das Kraftwerk KLAUS an der Steyr, dem wichtigsten Zubringer des Enns. Das gewählte Niederschlag-Abfluß-Modell setzt sich aus einem Modellteil zur Beschreibung der Abflußbildung und einem solchen zur Berechnung der Abflußkonzentration zusammen, die getrennt voneinander entwickelt wurden. Bestimmend für die Auswahl des Modells waren dabei einerseits die Kapazität des später zur Verfügung stehenden Prozeßrechners, auf den das Verfahren abzustellen war, und andererseits die positiven Erfahrungen bezüglich der Anwendung des Unit Hydrograph-Verfahrens im gegebenen Fall (3).

## 2. Beobachtungsunterlagen

Das Einzugsgebiet der Steyr umfaßt bis zum Pegel KLAUS eine Fläche von 542.4 km<sup>2</sup> und ist nahezu vollständig von Gebirgszügen umschlossen (Abb. 1). Das Gebiet weist ein relativ dichtes Netz von Beobachtungsstationen auf, wovon ein Großteil der Meßstellen jedoch erst seit kurzer Zeit in Betrieb ist. Längere Beobachtungsreihen liegen von der Pegelstelle KLAUS/Steyr sowie von den zwei Ombrographenstationen KLAUS und SPITAL a.P. vor. Als Ergänzung zur genaueren Erfassung der Niederschlagshöhen stehen noch die Beobachtungen von mehreren Niederschlagsmeßstellen zur Verfügung, von denen allerdings nur jene zwei zur Modell-Eichung herangezogen werden konnten, die in den letzten Jahren durch Regenschreiber ergänzt und durch Fernübertragungsleitungen angeschlossen wurden und somit im Prognosefall die entsprechenden Daten liefern können.

Die Untersuchungen basieren auf den Aufzeichnungen von 24 Hochwasserwellen aus dem Zeitraum 1956-70, die auch mehrere Einzel- bzw. Teilwellen umfassen. Die Auswertung der Fehler erfolgte für die Gesamtheit der Ereignisse und ebenso für die eigentlichen Hochwasserereignisse entsprechend einem Scheiteldurchfluß von  $HQ > 200 \text{ m}^3/\text{s}$ . Im folgenden wird durchwegs auf diese zweite, interessante Auswertung Bezug genommen.

## 3. Niederschlag-Abfluß-Modell

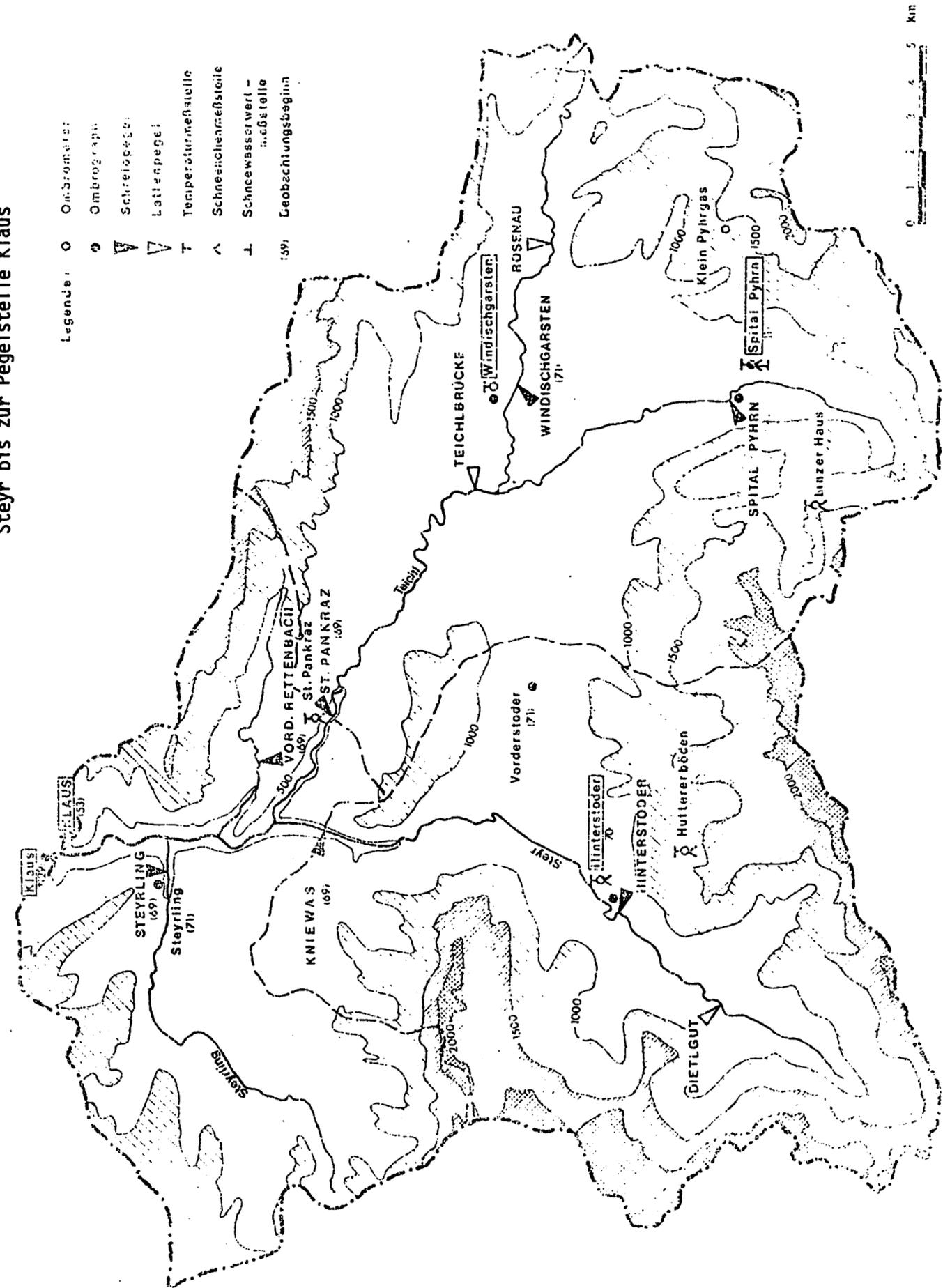
Den Kern des Modells bildet das Unit Hydrograph-Verfahren, das durch ein Abflußbildungs-Modell zur Ermittlung des abflußwirksamen Regens zu ergänzen war. Als solches wurde das mehrfach auch in der hydrologischen Vorhersagepraxis erfolgreich angewendete "Koaxial-Diagramm" (1, 2) herangezogen, wobei die Berechnung der Effektivregenganglinie aus der gewonnenen Abflußhöhe mittels des Konzeptes eines variablen Abflußbeiwertes nach dem Ansatz von KOEHLER (4) erfolgte.

Für die Berechnung der Basisabflußganglinie wurde ein einfaches Schema angenommen, demzufolge die Basisabflußganglinie vom Beginn des Ereignisses unter Beibehaltung des früheren Abstiegsmaßes bis zum Auftreten des Hochwasserscheitels kontinuierlich abfällt. Die Auslauftendenz folgt dabei einer Exponentialfunktion. Vom Zeitpunkt des Auftretens des Hochwasserscheitels an steigen die Basisabflüsse linear an und erreichen den größten Wert zu jenem Zeitpunkt, zu dem kein Direktabfluß mehr auftritt. Für die Berechnung dieses Scheitelwertes der Basisabflußwelle konnte eine Beziehung zwischen diesem Wert und der Abflußhöhe gefunden werden.

## 4. Analyse der Fehler-Quellen

Zur Beurteilung der in den einzelnen Phasen der Modell-Entwicklung zu registrierenden Fehler, soll zunächst auf die wichtigsten Fehlerquellen eingegangen werden. Prinzipiell können derartige Fehler durch eine nicht zutreffende Modell-Konzeption, durch eine nicht optimale Eichung der Modell-Parameter oder aber auch durch Fehler in den Beobachtungsdaten entstehen. Entsprechend dem Typ und dem Aufbau des verwendeten Modells, ist im vorliegenden Fall mit folgenden Fehlerquellen zu rechnen:

Abb. 1: Übersichtslageplan des Einzugsgebietes der Steyr bis zur Pegelstelle Klaus



Fehler bei der Berechnung des maßgebenden Niederschlages

- Für die Erfassung der Niederschlagsverhältnisse im Einzugsgebiet stehen im Prognosefall die 3 Stationen KLAUS, HINTERSTODER und WINDISCHGARSTEN zur Verfügung, aus deren Aufzeichnungen ein gewogenes Mittel gebildet wird. Als Gewichtsfaktoren dienen dabei die Verhältniszahlen  $f_i$  zwischen den auf die einzelnen Stationen nach orographischen Verhältnissen entfallenden Anteilflächen und der Größe des Gesamtgebietes. Aufgrund der Erfahrungen, wonach die Oberregnung des Gebietes nicht einheitlich erfolgt und je nach Ereignis stark schwankt (- einige Beispiele von großen Hochwässern zeigt Abb. 2 -), ist zu erwarten, daß durch diese Vorgangsweise die regionale Verteilung des Regens nicht genau genug wiedergegeben wird.
- Die Berechnung des maßgebenden Niederschlages fußt auf Beobachtungen, die in Talstationen gemacht wurden. Um die auf das ganze Gebiet entfallende Niederschlagshöhe zu ermitteln, muß daher die Zunahme des Niederschlages mit der Seehöhe abgeschätzt werden. Dies erfolgt über einen Umrechnungsfaktor, der aus dem Verhältnis der mittleren Jahresniederschlagshöhe des Gebietes zu jener in den Stationen gemäß

$$f = \frac{h_{N, Geb} (1901-50)}{\sum h_{N, stat_i} (1901-50) \cdot f_i}$$

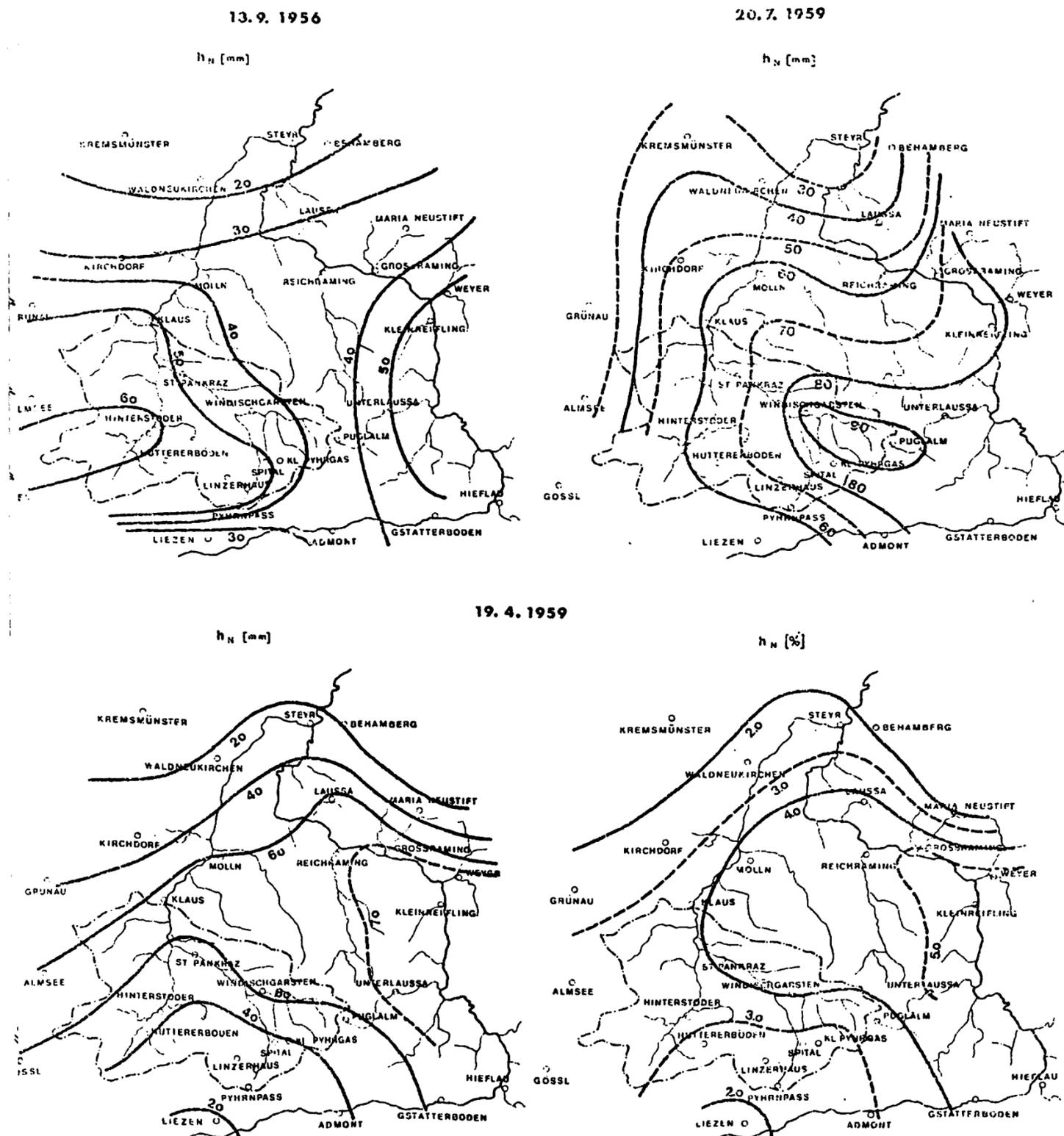
hergeleitet wird. Die den Berechnungen zugrundeliegende Annahme, daß die Größe dieses Umrechnungsfaktors auch für Einzelereignisse bzw. für kurze Zeitintervalle Gültigkeit besitzen soll, deckt sich allerdings nicht mit den vorläufigen Ergebnissen einer Analyse der regionalen Verteilung des Regens, die einen höheren prozentualen Niederschlagsanteil an der Jahressumme in jenen Gebietsteilen erkennen lassen, in denen auch die Jahresniederschlagshöhe groß ist.

- Durch die Aufstellung mehrerer Regenschreiber im Laufe der letzten Jahre ist es seit kurzem möglich, die zeitliche Verteilung des Regens in den verschiedenen Gebietsteilen zu erfassen. Die bisherigen Beobachtungen lassen deutlich erkennen, daß der in den einzelnen Stationen auftretende Regen innerhalb desselben Ereignisses einen zum Teil stark unterschiedlichen Verlauf nehmen kann. Es ist daher zu erwarten, daß bei der Erfassung des Regenverlaufes jener Ereignisse, die bei der Entwicklung des Verfahrens Verwendung fanden und für deren Beschreibung lediglich 2 Stationen zur Verfügung standen, Fehler in das Verfahren eingetragen werden.

Fehler im Koaxial-Diagramm

Ein Vergleich der beobachteten Rückhaltshöhen mit den nach dem Koaxial-Diagramm berechneten ergibt einen durchschnittlichen Fehler von 3,44 mm bei einer Standardabweichung von 3,24 mm.

- Diese vergleichsweise große Standardabweichung hat ihre Ursache in einigen erheblichen Abweichungen der berechneten von den gemessenen Werten, die in solchen Fällen auftreten, in denen ganz offensichtlich die Eingangsgröße Niederschlag fehlerbehaftet ist. Die bei der Anwendung des Koaxial-Diagrammes entstehenden Fehler sind daher zum Teil auf Fehler in den Beobachtungsdaten zurückzuführen.
- Auf die Güte der Berechnungen muß sich ferner auswirken, daß im Aufbau des Koaxial-Diagrammes nicht allen bei der Abflußbildung wirksamen Faktoren Rechnung getragen werden kann. So findet zum Beispiel die Regenintensität keine Berücksichtigung. Ebenso wenig ist es möglich, auf den zeitlichen Verlauf des Regens einzugehen, der sicherlich auf die Abflußhöhe von Einfluß ist, da ein Regen mit einer gegen das Regenende hin abfallenden Intensität unter sonst gleichen Bedingungen zu einer anderen Abflußhöhe führen muß als ein Regen mit steigender Intensität.
- Im Prognosefall wird das Koaxial-Diagramm vom ersten bis zum letzten Regenelement auch in allen Zwischenstufen eines Ereignisses zur Berechnung der Abflußhöhe angewendet. Diese Vorgangsweise ist durch die Art der Entwicklung des Diagrammes, bei der nur die Maßzahlen ganzer Ereignisse eingehen und keine Möglichkeit besteht, die innere Struktur der Ereignisse zu berücksichtigen, nicht ausreichend gedeckt.



**Abb. 2: Regionale Verteilung des Niederschlages bei einigen ausgewählten Hochwasserereignissen**

Fehlerhafte Wahl der Parameter der Effektivregenganglinie

- Der Ansatz zur Berechnung der Effektivregenganglinie aus der Abflußhöhe enthält 2 Parameter, deren Werte für jeden Prognosefall unter Bedacht des bisherigen Regenverlaufes prinzipiell neu festzulegen sind. Diese Feststellung ist durch die Auswertung der Beobachtungsergebnisse nicht eindeutig möglich, und die Abschätzung über ein gewähltes Kriterium kann nur zu den durchschnittlich günstigsten Werten bei gleichzeitigem Auftreten von Fehlern in den Einzelfällen führen.
- Der Parameter k nach KOEHLER (4) bzw. GN zur Berücksichtigung der Regenintensität wird im vorliegenden Fall fest mit GN = 0,5 angenommen. Die Ergebnisse bei der Rückrechnung der beobachteten Hochwasserwellen deutet jedoch darauf hin, daß bei Auftreten von Niederschlagsereignissen mit sehr großen Intensitäten der Parameter sich einem Wert von rund 1 nähern könnte.
- Der Parameter z nach KOEHLER (4) bzw. GT dient zur Abschätzung des Einflusses der Regendauer. Wie die Auswertungen zeigen, tritt der beste Wert für diesen Parameter sehr oft zu Beginn des intensiven eigentlichen Hauptregens auf. Da darüber hinaus das Vorwetter neben dem bisherigen Regenverlauf von Einfluß sein muß, liegt es nahe, die Parametergröße über einen Schwellenwert der Abflußhöhe abzuschätzen. Im Untersuchungsfall erhält man für  $h_{Akrit}$  einen Wert von 10 mm. GT ist in diesem Fall jener Zeitspanne zugeordnet, die zwischen dem Beginn eines Ereignisses und jenem Zeitpunkt, zu dem die berechnete Abflußhöhe den Wert von 10 mm übersteigt, verstreicht. Diese Art der Abschätzung kann im Einzelfall nur eine Annäherung an den jeweils besten Wert darstellen. Eine genauere Festlegung wäre vielleicht durch Einbeziehung der Regenintensität in das Kriterium möglich.

Fehlerhafter Unit Hydrograph

- Die Abflußberechnung erfolgt im allgemeinen unter Zugrundelegung eines "maßgebenden" Unit Hydrograph, der in der Regel durch Mittelbildung verschiedener geeigneter Unit Hydrographs gewonnen wird. Im vorliegenden Fall entstanden bei einem Vergleich der berechneten Unit Hydrographs 5 Gruppen mit verschiedener, unterscheidbarer Ganglinienform. Als Ursache für die Entstehung unterschiedlicher Unit Hydrograph-Formen können Unterschiede in der regionalen Verteilung des Regens bei den einzelnen Ereignissen, eine je nach Ereignis sich verschieden stark auswirkende Nichtlinearität des Abflußvorganges, aber auch Fehler in den Beobachtungen, die sich in einer mangelhaften gegenseitigen Übereinstimmung der verwendeten Regen- und Abflußganglinien ausdrücken sowie Fehler in der Berechnung der Effektivregenganglinie in Frage kommen.
- Die Versuche zur Klassifizierung der verschiedenen Unit Hydrographs führten zur Festlegung zweier "maßgebender" Unit Hydrographs, die durch das Kriterium  $R \geq 11 \text{ mm/h} \wedge R_w \geq 5 \text{ mm/h}$  voneinander getrennt werden. Mit der Einführung eines zweiten Unit Hydrographs ergibt sich zwar eine bessere, aber noch keine vollkommene Anpassung an die natürlichen Verhältnisse.

Fehler bei der Basisabfluß-Berechnung

- Für die Trennung der einzelnen Abflußkomponenten stehen wohl einige Konzeptionen zur Verfügung, doch gibt es noch keine objektive Methode. Im vorliegenden Fall wurde zwar versucht, durch Analyse der beobachteten Abflußganglinien einen Aufschluß über das Auftreten der verschiedenen Abflußkomponenten zu bekommen, der gewählte Abtrenn-Modus weist aber nach wie vor subjektiven Charakter auf. Dies spielt wohl eine geringe Rolle, wenn bekannte Hochwasserganglinien zurückgerechnet werden, weil in solchen Fällen die Abtrennung einerseits und die spätere Überlagerung der einzelnen Abflußkomponenten andererseits bei voller Information über den Gesamtverlauf in gleicher Weise vor sich gehen kann. Die Prognose schließt aber auch die Basisabflußganglinie ein, und zwar mitunter auch für solche Fälle, die bei der ursprünglichen Entwicklung des Teilmodells für den Basisabflußvorgang nicht herangezogen werden konnten - z.B. für komplexe, zusammengesetzte und zeitlich ineinander greifende Ereignisse. In diesen Fällen ist zwangsläufig mit dem Auftreten gewisser Unstimmigkeiten bei der Vorhersage zu rechnen.

- Eine weitere Fehlermöglichkeit hängt mit der Ermittlung der Parameterwerte zusammen. Die Grundlage des gewählten Schemas zur Berechnung der Basisabflüsse bildet die Annahme eines exponentiellen Abfalls der Abflüsse gemäß  $Q_t = Q_0 \cdot e^{-K_R \cdot t}$  im Falle des Aufhörens der Niederschläge. Verschiedene Auswertungsergebnisse deuten aber darauf hin, daß der Parameter  $K_R$  vom Abfluß abhängig ist, wofür aus dem unzureichenden Untersuchungsmaterial jedoch keine eindeutige Beziehung gefunden werden konnte. Für  $K_R$  wurden schließlich 2 Werte angesetzt, wovon der eine der Beschreibung des Abflußrückganges unmittelbar nach dem Aufhören des Direktabflusses und der zweite der Formulierung der längerfristigen Auslaufftendenz des Basisabflusses dient.

Fehler in den Beobachtungsdaten

- Bei der Entwicklung der Modellbausteine spielt die Zuverlässigkeit der Beobachtungsdaten - wie oben bereits mehrfach erwähnt - eine große Rolle. Im vorliegenden Fall lag die Unsicherheit weniger bei den Abflußangaben, die über relativ gut belegte Abflußkurven zu gewinnen waren, als bei den Niederschlagswerten. Hierbei wirkte sich vor allem störend aus, daß Regenschreiber öfters während eines Ereignisses ausfielen und sich die maßgebende Regenganglinie daher sehr unsicher bestimmen ließ.
- Nicht direkt als Fehler im obigen Sinn zu klassifizieren sind jene Abweichungen, die entstehen, wenn die bis zum Zeitpunkt der Prognose beobachteten Niederschläge für eine genaue Bestimmung der Abflüsse auf einige Stunden hinaus nicht ausreichen. Abweichungen dieser Art haben ihre Ursache in der überaus raschen Abflußreaktion des Gebietes auf intensive Niederschläge. Daher sind die bei Unkenntnis der Größe des auf den Prognosezeitpunkt folgenden Regenelementes vorhergesagten Abflüsse im Falle einer hohen Regenintensität viel zu gering. Eine wirkliche Abhilfe könnte hier nur eine zutreffende Niederschlagsprognose bringen, die zur Zeit allerdings noch nicht möglich erscheint. Um innerhalb des entwickelten Verfahrens diesen Mangel wenigstens zum Teil auszugleichen, wurde versucht, den Niederschlagsverlauf auf kurze Zeit (- 1 bis 2 Stunden -) näherungsweise vorherzubestimmen (siehe Seite 75).

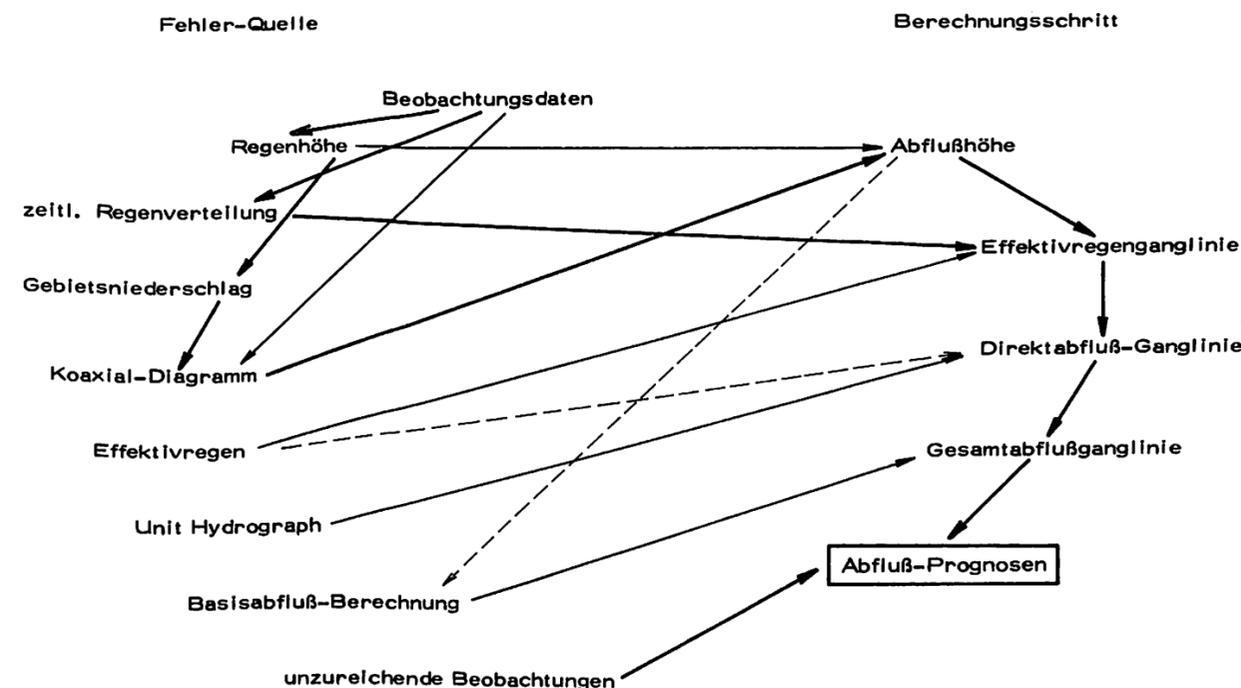


Abb. 3: Übersicht über das Wirksamwerden verschiedener Fehlerquellen bei der Modellentwicklung

Zwecks Gewinnung einer Übersicht über die einzelnen Fehlertypen und über ihr Auftreten bei der Entwicklung des Verfahrens sind in Abb. 3 Fehlertypen und Modellbausteine einander gegenübergestellt und die wichtigsten Beziehungen auf den einzelnen Stufen eingetragen. Mit Hilfe dieser Zuordnung sollen die Fehler in den verschiedenen Stadien der Modell-Entwicklung im folgenden nunmehr analysiert werden.

5. Auswertung der Fehler-Berechnung

Der Vorgangsweise bei der Modellerstellung entsprechend, die in einzelnen Schritten mit einer laufenden Eichung des jeweils neuen Modell-Bausteins erfolgt, wurde in jedem Abschnitt eine Rückrechnung der beobachteten Hochwasser- (bzw. Direktabfluß-) Ganglinien durchgeführt. Als Maß für die Beurteilung der Güte der Anpassung der berechneten Ganglinie an die beobachtete diente das "Streuungsverhältnis", das als Wurzel des Quotienten zwischen Fehlerquadratsumme und Quadrat der Abweichungen der beobachteten Werte von deren Durchschnitt gemäß

$$F = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i\text{ber}} - Q_{i\text{beob}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i\text{beob}} - \bar{Q}_{\text{beob}})^2}}$$

angeschrieben werden kann.

Im Laufe der Ausarbeitung des Verfahrens wurden 10 Kontrollberechnungen durchgeführt, die aus der nachstehenden Übersicht im Zusammenhang mit dem entsprechenden Entwicklungsschritt zu entnehmen sind.

Berechnung	Verfahrensschritt
①	Unit Hydrograph-Ermittlung
②	Ermittlung von GN
③	Ermittlung von GT
④	Ermittlung der Abflußhöhe $h_A$ (Einbeziehung des Koaxial-Diagrammes)
<u>Durchführung 1-stündiger Vorhersagen der Direktabflüsse:</u>	
⑤	... ohne gesonderte Berechnung der Effektivregenganglinie
⑥	... mit gesonderter Berechnung der Effektivregenganglinie
<u>Durchführung 1-stündiger Vorhersagen der Gesamtabflüsse:</u>	
⑦	Einbeziehung der Basisabflußberechnung
⑧	Einbeziehung des Korrekturgliedes
⑨	Einbeziehung einer 1-stündigen Niederschlags-"Prognose"
⑩	Einbeziehung einer 2-stündigen Niederschlags-"Prognose"

Mit der Berechnung ⑦ ist die Entwicklung des Niederschlag-Abfluß-Modells abgeschlossen. Die ergänzenden Berechnungen ⑧ bis ⑩ stellen Versuche dar, Korrektur- bzw. Ergänzungsglieder in das Verfahren einzu-

bauen mit dem Ziel, die Güte der Abflußvorhersagen zu verbessern.

Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung der Ergebnisse der Kontrollberechnungen für die 13 größten Hochwässer der Steyr. Neben den Fehlergrößen F in den ersten 8 Entwicklungsschritten für jedes einzelne Hochwasser enthält die Tabelle auch Durchschnitt F und Standardabweichung  $s_F$  bei Betrachtung der Gesamtheit der Ereignisse. Vergleicht man diese Werte miteinander, so lassen sich Aussagen über die Wirkung der einzelnen Modellbausteine machen.

Hochwasser Nr.	Fehlergröße F im Berechnungsschritt							
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
1	0,233	0,311	0,153	0,195	0,254	0,302	0,221	0,061
2	0,219	0,283	0,214	0,281	0,195	0,178	0,183	0,055
3	0,550	0,516	0,516	0,535	0,615	0,637	0,470	0,086
7	0,095	0,109	0,109	0,357	0,258	0,256	0,208	0,053
8	0,417	0,320	0,320	0,557	0,590	0,620	0,571	0,071
9	0,233	0,209	0,209	0,211	0,288	0,237	0,259	0,093
10	0,337	0,203	0,203	0,287	0,291	0,206	0,374	0,083
23	0,339	0,226	0,199	0,214	0,255	0,326	0,469	0,109
24	0,243	0,249	0,143	0,373	0,387	0,344	0,514	0,117
29	0,112	0,146	0,146	0,232	0,241	0,185	0,278	0,079
33	0,258	0,258	0,258	0,345	0,351	0,357	0,490	0,120
35	0,191	0,122	0,122	0,429	0,448	0,432	0,534	0,112
37	1,090	0,852	0,354	0,457	0,550	0,549	0,916	0,101
F	0,332	0,293	0,227	0,334	0,361	0,356	0,422	0,088
$s_F$	0,258	0,198	0,114	0,122	0,147	0,159	0,202	0,023

Tabelle 1: Ergebnisse der Ganglinienberechnung in verschiedenen Stadien der Modellentwicklung.

Das Ergebnis von Berechnung ① kennzeichnet die Güte der Rückrechnung der Direktabfluß-Ganglinie mit den beiden "maßgebenden" Unit Hydrographs unter Verwendung einer Effektivregenganglinie, deren Parameter jenen Werten entsprechen, die bei den einzelnen Ereignissen jeweils zu dem "besten" Unit Hydrograph - im Sinne eines Unit Hydrographs mit glattem Verlauf ohne Schwingungen - führten. Der üblichen Klassifikation zufolge kann das Resultat dieser Rückrechnung noch als "gut" bezeichnet werden.

Berechnung ② dient der Festlegung des optimalen Parameterwertes von GN, nachdem einzelne Rückrechnungen gezeigt hatten, daß jener Wert von GN = 1,5, der nach dem Kriterium "Unit Hydrograph-Form" gewonnen wurde, nicht zu einer optimalen Nachbildung der beobachteten Abflußganglinie führt. Ein Gewichtungsfaktor von GN = 1,5 betont sehr stark die Regenelemente mit hohen Intensitäten. Die danach berechnete Effektivregenganglinie erhält einen deutlich ausgeprägten Regenblock, was im allgemeinen zwar zu einem glatteren Verlauf des Unit Hydrograph als die Berechnung mit einer Effektivregenganglinie mit weniger ausgeprägten Starkregenblöcken führt, jedoch nicht zu einer optimalen Wiedergabe der beobachteten Abflüsse, zu deren Beurteilung die Größe

der Fehlerquadratsumme als Kriterium herangezogen wurde. Der günstigste Wert von GN liegt nach den vorliegenden Untersuchungen im Durchschnitt bei  $GN \approx 0,5$ .

Ein sehr deutlicher Genauigkeitserfolg gegenüber dem vorstehenden Resultat ergab sich nach Einführung des besten Wertes des Parameters GT (Berechnung ③). Mit einem Durchschnittswert für das Streuungsverhältnis von  $F = 0,229$  bei gleichzeitig starker Reduktion der Standardabweichung rückt das Ergebnis bereits in die Nähe einer "sehr guten" Bewertung ( $F \approx 0,2$ ). Die in diesem Stadium der Entwicklung nach Optimierung der Parameter der Effektivregenganglinie noch auftretenden Restfehler haben ihre Ursache vor allem in mangelhaften Ausgangsdaten. Zu einem geringen Teil kann auch das Unit Hydrograph-Konzept dazu beitragen, wobei nach den Erfahrungen bei verschiedenen Vergleichsberechnungen eine Änderung der Unit Hydrograph-Form nur in jenen Fällen, in denen extreme Regenintensitäten auftraten, einen gewissen Einfluß ausübt.

Wie das Ergebnis von Berechnung ④ zeigt, führt die Einbeziehung des Koaxial-Diagrammes zu einer starken Einbuße an Genauigkeit. Aus dem Vergleich der Resultate von Berechnung ③ bzw. ④ kann der Schluß gezogen werden, daß der Prozeß der Abflußbildung im Einzugsgebiet mit dem verwendeten Modell noch nicht befriedigend erfaßt ist. Eine endgültige Beurteilung wird allerdings dadurch erschwert, daß die Ergebnisse der Abflußhöhenberechnung über das Koaxial-Diagramm bei einigen Ereignissen stark durch fehlerbehaftete Ausgangsdaten beeinflusst waren.

In den weiteren Berechnungen erfolgt der Versuch einer laufenden 1-stündigen Vorhersage, wobei zunächst in den Berechnungen ⑤ und ⑥ Varianten hinsichtlich der Anwendung des für die Programmerstellung etwas starren Systems der Ermittlung des Effektivregens über das Koaxial-Diagramm studiert wurden.

Berechnung ⑤ gilt der Feststellung des abflußwirksamen Anteils eines Regenelementes durch Bildung der Differenz der Abflußhöhen zu Beginn und am Ende des betrachteten Zeitabschnittes. Das Ergebnis zeigt im Vergleich zu Berechnung ④ eine geringe Verschlechterung der Gangliniennachbildung, die zum Teil auf die Effektivregenermittlung und teilweise auf die in Berechnung ⑤ erstmals vorgenommene Prognoseermittlung zurückzuführen ist, wobei sich die 1-stündigen Prognosewerte im allgemeinen nur geringfügig von den Werten der eigentlichen Ganglinienberechnung bei vollständiger Kenntnis des Regenverlaufes unterscheiden.

Als Variante dazu wird in Berechnung ⑥ die Effektivregenermittlung zu jedem Zeitpunkt unter Verwendung des Ansatzes von KOEHLER mit den oben ermittelten Parameterwerten durchgeführt, wodurch auch die Regenintensität und der Regenverlauf Berücksichtigung finden können. Das Ergebnis zeigt zwar im Durchschnitt praktisch keine Verbesserung gegenüber der einfacheren Effektivregenermittlung nach Berechnung ⑤, wohl aber bei Betrachtung der größten Hochwasserereignisse (Welle Nr. 9 und 10), deren möglichst genaue Wiedergabe bzw. Vorhersage von besonderem Interesse ist. Für die endgültige Prognoseerstellung wird daher diese Variante übernommen.

Die Fehlerwerte nach Berechnung ⑦ gelten wiederum für eine 1-stündige Vorhersage, diesmal jedoch bereits für die Gesamtabflüsse. Im Vergleich zu Berechnung ⑥ stellt sich eine Verschlechterung des Ergebnisses ein, derzufolge die Güte der Vorhersage von "gut" auf "brauchbar" ( $0,4 < F \leq 0,6$ ) abnimmt. Die Ursache dafür ist in Fehlern zu sehen, die durch die Einbeziehung der Basisabflußberechnung entstehen und die sich vor allem bei längeren Hochwässern mit mehreren Teilwellen (z.B. Welle Nr. 37) und einer späten Kulmination ergeben. In solchen Fällen verliert die Annahme einer kontinuierlichen Abnahme der Basisabflüsse bis zum Zeitpunkt des Scheiteldurchflusses ihre Gültigkeit, weil die Basisabflüsse bereits zu einem früheren Zeitpunkt wieder anzusteigen beginnen. Als Auswirkung der in solchen Fällen nicht gültigen Modellkonzeption weisen die berechneten bzw. prognostizierten Abflüsse vielfach zusätzliche Fehler in der Größenordnung von  $10 - 20 \text{ m}^3/\text{s}$  auf, die zwar gemessen an den Hochwasserabflüssen nicht gerade groß erscheinen, bei Berechnung der Fehlerquadratsumme jedoch zu einer merklichen Verschlechterung der Resultate führen.

Das Ergebnis der letztgenannten Berechnung kennzeichnet die Möglichkeiten einer Abflußermittlung mit dem gewählten Niederschlag-Abfluß-Modell. Die Bewertung dieser Berechnung mit dem Gesamturteil "brauchbar" ließ

den Wunsch aufkommen, die Ergebnisse zu verbessern. Dies war allerdings mit den zur Verfügung stehenden Daten im Rahmen des Modells nicht durchführbar, wenn auch die Fehlermöglichkeiten bekannt waren. Eine Fehleranalyse zeigte jedoch sehr bald, daß die Fehler zum Teil systematisch auftreten, die vor allem auf entsprechende - der Tendenz nach bei mehreren aufeinanderfolgenden Prognosen gleichbleibende - Fehler bei Anwendung des Koaxial-Diagrammes bzw. der Basisabflußberechnung zurückzuführen sind. Als Korrekturglied wurde der bei der letzten 1-stündigen Prognose aufgetretene Fehler herangezogen.

Korrigiert man die berechneten Abflüsse (Vorhersagewerte für  $T_{\text{prog}}$ )  $Q_{\text{ber}}(t+T_{\text{prog}})$  mittels des Ansatzes

$$Q_{\text{ber, korr}}(t+T_{\text{prog}}) = Q_{\text{ber}}(t+T_{\text{prog}}) - \left\{ Q_{\text{ber}}((t-1)+1) - Q_{\text{beob}}(t) \right\},$$

worin der Klammerausdruck den Fehler bei der letzten 1-stündigen Prognose darstellt (Berechnung ⑧), so erhält man durchgehend wesentlich bessere Ergebnisse als nach den nicht korrigierten Berechnungen. Die Beurteilung der solcherart verbesserten Vorhersagen ist mit "sehr gut" zu klassifizieren. Aus der deutlichen Verbesserung der Ergebnisse kann rückwirkend geschlossen werden, daß zwischen den Fehlern aufeinanderfolgender Vorhersagen eine bestimmte Abhängigkeit bestehen muß.

Abb. 4 zeigt die Beurteilung der Ergebnisse der Kontrollberechnungen im Verlauf der Modellentwicklung.

Eine Analyse der Fehler bei der Erstellung der Vorhersagen für verschiedene Zeitabschnitte (im vorliegenden Fall 1, 2, 3, 4, 6 und 8 Stunden) ließ erkennen, daß mit zunehmender Länge des Prognosezeitraumes die Größe der Fehler erwartungsgemäß zunahm (Tabelle 2, Zeile 1 bzw. 2). Die rasche Abflußreaktion des Einzugsgebietes auf intensive Niederschläge führt dazu, daß eine mehrstündige Vorhersage der Abflüsse ohne eine Niederschlagsvorhersage nicht mehr befriedigend ausfällt. Da zur Zeit jedoch noch keine Möglichkeit für die Einführung einer zutreffenden Niederschlagsprognose besteht, wurde schließlich versucht, den künftigen Niederschlagsverlauf zumindest näherungsweise abzuschätzen.

Die Berechnungen ⑨ und ⑩ stellen 2 Varianten zur Verbesserung der Eingangsgröße Niederschlag dar, wobei im ersten Fall die Annahme gilt, daß der abflußwirksame Regen des letzten Zeitintervalles auch in der kommenden Stunde noch einmal auftreten wird (Abb. 5). Wie die Ergebnisse zeigen (Tabelle 2, Zeile 3), lassen sich damit für die 2- bis 8-stündige Vorhersage erhebliche Verbesserungen erzielen. Eine Ausdehnung dieser Niederschlags-"Prognose" auf zwei künftige Zeitintervalle brachte eine weitere Steigerung der Genauigkeit, hier allerdings nur mehr bei Prognosefristen von 6 bzw. 8 Stunden (Tabelle 2, Zeile 4).

Berechnung Nr.	Prognosefrist in Stunden					
	1	2	3	4	6	8
7	0,400	0,405	0,422	0,450	0,558	0,679
8	0,079	0,141	0,215	0,301	0,473	0,636
9	0,083	0,136	0,197	0,270	0,426	0,574
10	0,083	0,141	0,202	0,275	0,420	0,548

Tabelle 2: Gesamtstreuungsverhältnis F in Abhängigkeit von der Prognosefrist.

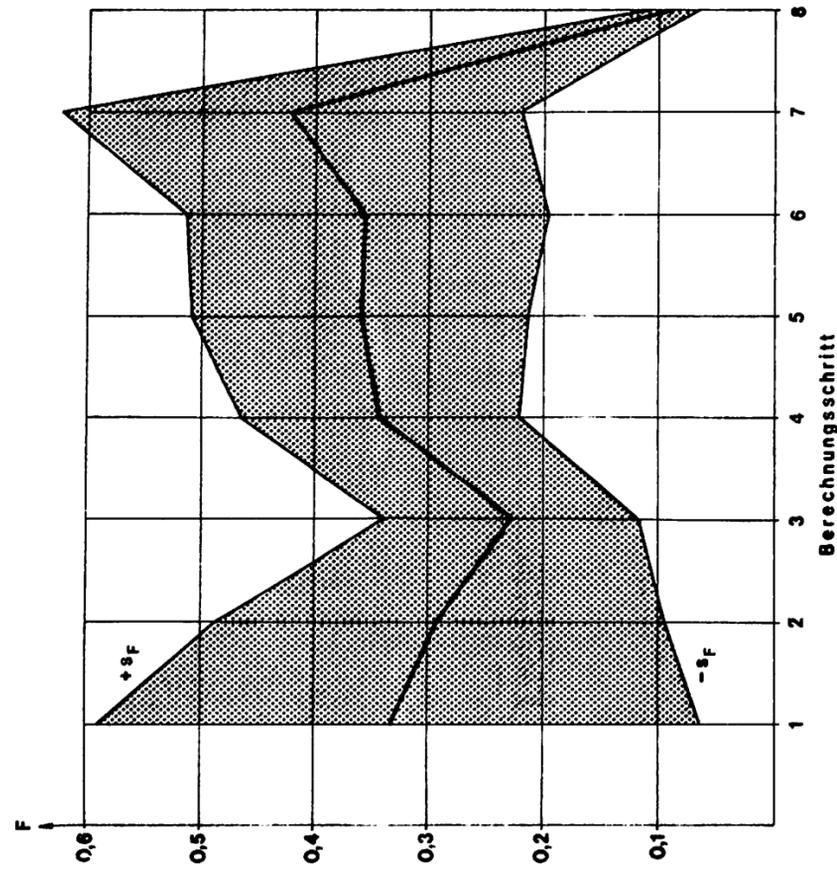


Abb. 4: Streuungsverhältnis  $F$  für die einzelnen Entwicklungsschritte

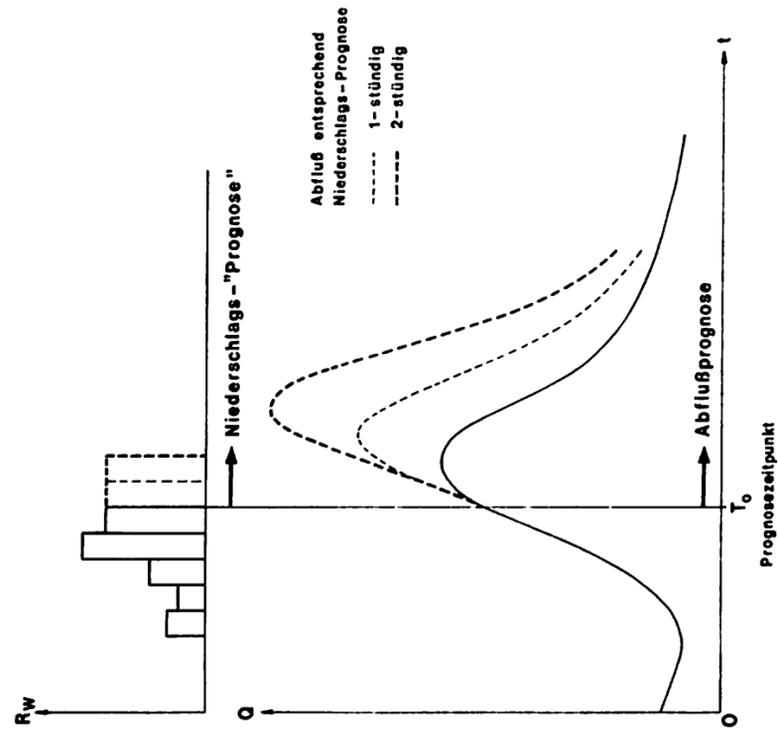


Abb. 5: Erweiterung des Prognosezeitraumes durch Einführung einer Niederschlags-„Prognose“

## 6. Schlußbetrachtung

Eine zusammenfassende Beurteilung der angeführten Ergebnisse führt zu folgenden Aussagen über das Auftreten von Fehlern bei der Anwendung des gewählten Niederschlag-Abfluß-Modells zur Erstellung von Hochwasservorhersagen:

Neben fehlerhaften und unzureichenden Beobachtungsdaten, die ein gewisses Fehlerausmaß praktisch kaum unterschreiten lassen, (s. Berechnung ③), bewirken vor allem die Einbeziehung des Koaxial-Diagrammes sowie die Einbeziehung des gewählten einfachen Modells zur Basisabflußberechnung einen verhältnismäßig hohen Fehler-Eintrag in das Verfahren. Es zeigt sich dabei, daß die auftretenden Fehler bis zu einem bestimmten Grad voneinander abhängig sind, was auch durch den Erfolg bei Einführung eines Korrekturgliedes, das mit dem Fehler bei der letzten Abflußprognose identisch ist, bestätigt wird.

Für eine wesentliche Verbesserung der Vorhersagen bei mehrstündigen Prognosefristen ist eine entsprechende Niederschlagsprognose Voraussetzung. Ein gewisser Genauigkeitserfolg läßt sich durch Einführung einfacher Ergänzungsglieder (s. Berechnungen ⑨ und ⑩) erzielen. Weitere Untersuchungen sollen aufzeigen, inwieweit bei Änderung der Annahmen über den künftigen Regenverlauf, zusätzliche Verbesserungen erreicht werden können.

## Literaturhinweise

1. BECKER, A. Starkregen-Abfluß-Beziehung in Form einer koaxialen graphischen Darstellung zur Vorherbestimmung des Starkregenabflusses aus einem kleinen Einzugsgebiet der DDR. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 14 (1964), S. 120 - 125
2. BECKER, A. Ergebnisse einer Untersuchung über die Struktur der koaxialen graphischen Starkregen-Abfluß-Beziehung. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 16 (1966), S. 90 - 94
3. GUTKNECHT, D. Praktische Erfahrungen mit der Anwendung des Unit Hydrograph-Verfahrens an einem österreichischen Donau-Zubringer. 6. Konferenz der Donauländer für hydrologische Vorhersagen, Kiew, 1971
4. KOEHLER, G. Ermittlung maßgebender Abflußdaten für kleinere Vorfluter mit Hilfe kurzzeitiger Naturmessungen. Mitteilung aus dem Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Technischen Universität Hannover, Heft 23, 1971.

DIE VORHERSAGE VON HOCHWASSERGANGLINIEN IN KLEINEN  
EINZUGSGEBIETEN AUS REGENMESSUNG MIT RADAR

B. Anderl, W. Attmannspacher, G.A. Schultz

1. Radar als Meßgerät für die Erfassung von Flächen-niederschlag (W. Attmannspacher)
2. Vorhersagen der Hochwasserganglinien (B. Anderl, G.A. Schultz)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЛИНИЙ ХОДА ПАВОДКОВ В НЕБОЛЬШИХ  
БАССЕЙНАХ ПО РАДАРНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

Б. Андерль, В. Атманнспахер, Г. А. Шульц

1. Радар как измерительный прибор для учета осадков на площади (В. Атманнспахер)
2. Прогнозирование линий хода паводков (Б. Андерль, Г. А. Шульц)

Zusammenfassung:

Im Alpenvorland, südlich von München, werden seit einigen Jahren quantitative Niederschlagsmessungen mit Wetterradar und gleichzeitig mit einem sehr dichten herkömmlichen Meßnetz durchgeführt. An zwei nahegelegenen kleinen Einzugsgebieten stehen Pegelmessungen zur Verfügung. Mit Ergebnissen dieser Messungen wird die Möglichkeit überprüft, Radargeräte zur Hochwasservorhersage einzusetzen. Dazu bilden die verschiedenen Niederschlagsmessungen den Eingang in ein hydrologisches Modell, dessen Ausgang - die berechnete Hochwasserganglinie - mit der gemessenen Ganglinie verglichen wird. Das diskrete hydrologische Modell besteht aus Translations- und Retentionselementen.

Der Niederschlag aus Radarmessung liefert Ergebnisse, deren Genauigkeit dem sehr dichten Spezialmaßnetz mindestens ebenbürtig ist, während das gewöhnlich vorhandene Meßnetz des Deutschen Wetterdienstes wesentlich ungünstiger abschneidet. Zum Abschluß wird an Berechnungsbeispielen gezeigt, wie die Hochwasservorhersage mit Radareingabe als "On-Line-Prozess" erfolgen kann.

Резюме:

В предгорьях Альп, южнее Мюнхена, уже на протяжении многих лет проводятся количественные измерения атмосферных осадков с помощью радарной установки для погоды и в то же время с очень густой традиционной измерительной сетью. В двух рядом лежащих маленьких бассейнах имеются в распоряжении футбольные измерители. С помощью результатов этих измерений проверяется возможность использования задарных установок для прогнозирования паводков. Всевозможные измерения атмосферных осадков создают вход в гидрологическую модель, выходом которой являются рассчитанные линии хода паводков, которые сравниваются с измеренными линиями хода. Дискретная гидрологическая модель состоит из трансляционных и ретенционных элементов.

Осадки, измеренные радаром, приводят к результатам, точность которых по крайней мере равна точности очень густой специальной измерительной сети, в то время как обычно применяемая сеть измерений немецкой службы погоды существенно менее благоприятна. В заключение, на примерах расчета показано, как прогнозирование паводков по входным данным, измеренных с помощью радара, может происходить как "Он-Лайн-процесс".

1. Radar als Meßgerät für die Erfassung von Flächenniederschlag

1904 wurde vom kaiserlichen Patentamt Deutschlands ein Gerät des Ingenieurs HOLSMEYER zur Aufnahme der von einem Schiff reflektierten Funkwellen patentiert. Rund 30 Jahre später wurde dieser Gedanke wieder aufgegriffen und praktisch brauchbare Funkortungsverfahren in mehreren Ländern entwickelt. Dabei stellte sich heraus, daß Schlechtwettergebiete, besonders der Niederschlag, Störungen dieses Ortungsverfahrens bewirken. Schließlich erkannten die Meteorologen, daß diese Störungen als Grundlage zur Bestimmung des Flächenniederschlags genutzt werden können.

Das Meßprinzip ist einfach. Man sendet einen elektronischen Impuls aus und mißt die Stärke des vom Niederschlag reflektierten Echos. Nach der Mie-Theorie ergibt sich mit der Rayleigh-Approximation (Regentropfen-durchmesser wesentlich kleiner als benutzte Wellenlänge) die allgemeine Radargleichung zu

$$P_r = \frac{P_t \cdot h \cdot A_e}{8\pi \cdot r^2} \cdot F \cdot K \cdot \Sigma\sigma \quad [1]$$

dabei ist:

- $P_r$  = empfangene Energie
- $P_t$  = ausgestrahlte Energie
- $h$  = Impulslänge
- $A_e$  = effektive Antennenfläche
- $r$  = Entfernung zum Echogeber
- $F, K$  = Korrekturfaktoren
- $\sigma$  = äquivalente Rückstrahlfläche

Die Größen dieser Gleichung können in zwei Hauptgruppen zusammengefaßt werden: Größen, die sich aus dem benutzten Radargerät ergeben und Größen, die durch den Echogeber, hier also die Niederschlagsteilchen, bedingt sind. Eine quantitative Flächenniederschlagsmessung erfordert zwangsläufig eine weitestgehende Konstanz der elektronischen Daten des Gerätes während der Messung. Diese Forderung ist bei Radargeräten mit Elektronenröhrenbestückung nur schwer erfüllbar, sie kann bei voll transistorisierten Geräten meist als erfüllt angesehen werden. Natürlich müssen die elektronischen Radardaten regelmäßig überprüft werden.

Die Niederschlagsteilchen obiger Gleichung sind in der äquivalenten Rückstrahlfläche enthalten:

$$\Sigma\sigma = \pi^5 \frac{(\epsilon - 1)}{(\epsilon + 2)} \frac{\Sigma i \cdot n_i \cdot D_i^6}{\lambda^4} \quad [2]$$

dabei ist:

- $\epsilon$  = komplexe Dielektrizitätskonstante
- $\lambda$  = Wellenlänge
- $n$  = Tropfenzahl
- $D$  = Tropfendurchmesser

Die meteorologische Hauptschwierigkeit ergibt sich aus dieser zweiten Gleichung: In die Berechnung geht die sechste Potenz des Durchmessers der vom Radarstrahl erfaßten Regentropfchen ein, der meist nicht oder nur bedingt bekannt ist. Um praktisch gut verwertbare Ergebnisse erzielen zu können, erscheint es demnach sinnvoll, einen Weg zu suchen, der diese Schwierigkeit umgeht.

Für die Flächenniederschlagsmessung müssen weitere Forderungen an das Radargerät gestellt werden:

1. Der Radarstrahl (die Hauptkeule) muß so scharf gebündelt sein, daß das gesamte Radarvolumen (der Raum aus dem das Echo jeweils kommt) praktisch nur mit Niederschlag gefüllt ist. Daraus ergibt sich die Forderung der meteorologisch noch sinnvollen maximalen Größe der horizontalen Strahlbreite.
2. Der Niederschlag soll möglichst knapp über der Erdoberfläche erfaßt werden, um sicher zu sein, daß die gemessenen Niederschlagsteilchen wirklich am Meßort den Boden erreichen.
3. Die Übergangszone zwischen Wassertropfen und Eisteilchen, d.h. also der Bereich der Nullgradgrenze soll nicht erfaßt werden, da hieraus unterschiedliche, nicht mehr eindeutig definierte Echos kommen.

Aus Forderung 2 und 3 ergibt sich die Notwendigkeit einer scharfen vertikalen Bündelung des Radarstrahls.

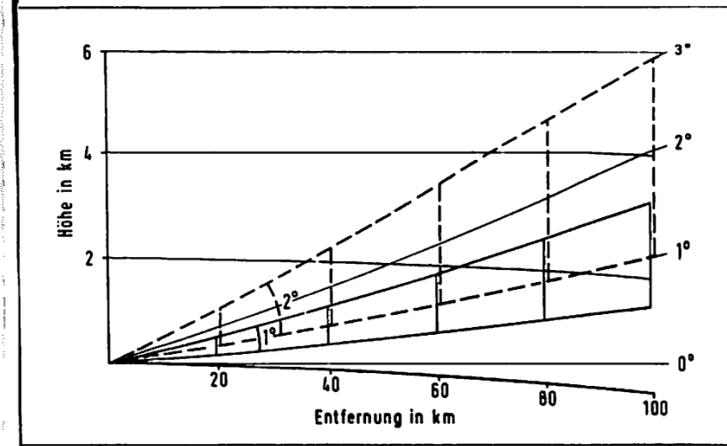


Abb. 1: Radarstrahlbreite für 1° und 2° als Funktion der Entfernung und der Höhe.

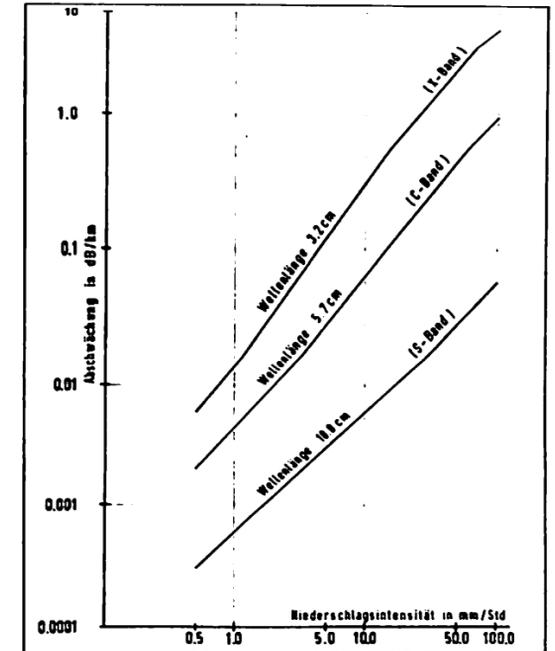


Abb. 2: Abschwächung der Radarenergie durch Niederschlag für 3 Wellenlängen.

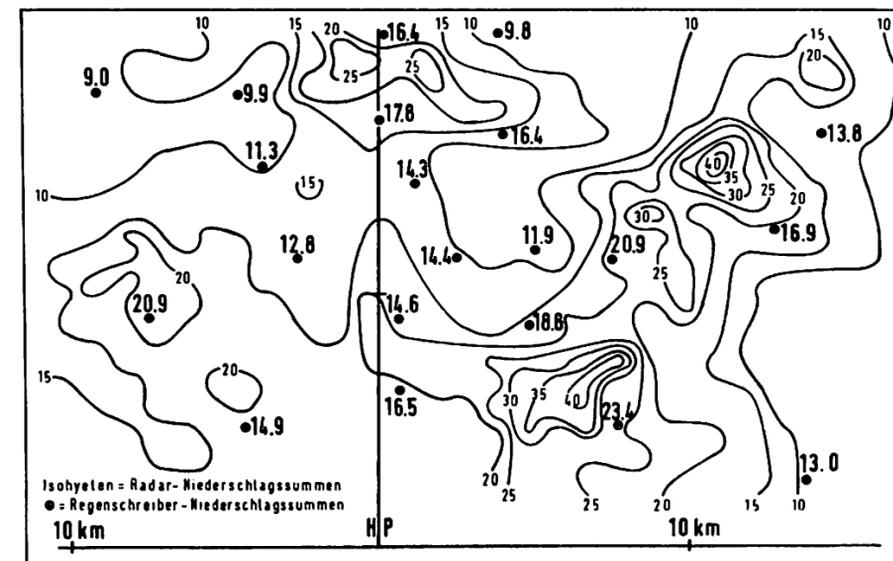


Abb. 3: Vergleich zwischen Radar- und Punktmessung (in mm), Regenschauer 28./29.7.1972 20.20-03.20 MEZ.

Die Ausdehnung des Radarstrahlwinkels als Funktion zeigt Abb.1. Aus ihm folgt, daß für quantitative Niederschlagsmessungen praktisch eine Radarhauptkeule von  $1^\circ$  notwendig ist, um die genannten Forderungen zu erfüllen. Elektronisch ist diese Forderung umso schwerer zu realisieren je größer die Wellenlänge des Radars ist; man braucht einen Antennenspiegel vom 7 m für 10 cm, von 3.5 m für 5 cm und von 2.1 m für 3 cm Wellenlänge. Trotzdem ist das 3 cm Radar (X-Band) keinesfalls das ideale Regenmeßgerät, da bei ihm eine neue Schwierigkeit auftaucht; die nur bedingt korrigierbare Dämpfung der elektronischen Energie durch den Niederschlag selbst ist bei dieser Wellenlänge Abb. 2 am stärksten.

Für die praktischen Messungen stand uns bis vor wenigen Monaten nur ein X-Band-Radar (3.2 cm) zur Verfügung; wir mußten uns deshalb auf die Messung einzelner Niederschlagsereignisse beschränken. Zur Vermeidung der genannten Schwierigkeiten mit der sechsten Potenz der Tropfendurchmesser berechneten wir zunächst aufgrund eines mittleren, im aktuellen Fall sicher falschen, Tropfenspektrums einen sog. Rohniederschlag, der, addiert über die Gesamtniederschlagsdauer, mit dem Meßergebnis eines Niederschlagschreibers an einem Ort verglichen wird. Mit dem dabei bestimmten Korrekturfaktor wurden die Radar-Rohniederschlagsmeßergebnisse des gesamten Meßgebietes schließlich multipliziert. Die Einführung der sog. "Aneichmethode" führte zu recht guten Meßergebnissen im Vergleich zum Bodenmeßnetz. Eine derartig gewonnene Flächenniederschlagsmessung zeigt Abb.3. In ihm sind zusätzlich die Meßwerte eines gesonderten dichten Niederschlagsmeßnetzes eingetragen. Bereits aus diesem Beispiel ist klar erkennbar, daß aktuelle Flächenniederschläge nur vom Radar erfaßt werden können; eine noch so gute Punktmessung ist nicht repräsentativ für die Fläche.

Die bisherige halbautomatische Radaraufnahme und -auswertung ist für die Praxis ungeeignet. Wir sind zur Zeit dabei, mit einem neuen C-Band-Radar (5 cm Wellenlänge), das direkt mit einem elektronischen Rechner verbunden ist, die ersten Schritte zur vollautomatischen Meßmethode zu gehen.

Die bisherige halbautomatische Aufnahme und die neue Anlage wollen wir Ihnen auf Ihrer Exkursion am 4. Oktober zeigen.

## 2. Die Vorhersage von Hochwasserganglinien in kleinen Einzugsgebieten aus Regenmessungen mit Radar

(Anderl / Schultz)

### 1. Einleitung

Neben der Wasserstandsvorhersage an großen Flüssen gewinnt in letzter Zeit die kurzfristige Vorhersage von Abflußganglinien in kleinen und mittleren Einzugsgebieten, z.B. zur Steuerung von Speichern und Regelbauwerken, an praktischer Bedeutung. Um die zukünftige Ganglinie möglichst frühzeitig zu kennen, ist es hier erforderlich, vom gemessenen Niederschlag auszugehen. Die Niederschlagsmeßgeräte müssen zu diesem Zweck direkt mit einer Zentrale verbunden sein, welche die Messungen sofort weiterverarbeitet.

Bei der bisher üblichen punktförmigen Meßmethode mit Regenschreibern und ähnlichen Geräten ist eine Vielzahl von Standorten notwendig, um den flächenmäßig stark unterschiedlichen Niederschlag ausreichend genau zu erfassen. Demgegenüber wurde in den letzten Jahrzehnten eine Methode zur Flächenniederschlagsmessung mit Radar entwickelt, welche von einem Radarstandpunkt aus die Messung über dem umgebenden Gebiet erlaubt. Mit den sofort für ein oder mehrere Einzugsgebiete an einem Punkt vorliegenden Daten können über ein geeignetes hydrologisches Modell Abflußganglinien vorhergesagt werden.

Diese an sich faszinierende Möglichkeit wurde jedoch bisher wegen verschiedener Schwierigkeiten, die im Weiteren erwähnt sind, noch nicht ausgenutzt. Von technischer Seite her galt es vor allem den Haupteinwand zu prüfen, die Radarmessung liefere keine quantitativen sondern nur qualitativ verwertbare Ergebnisse. Zur Klärung dieser Frage betreibt das Meteorologische Observatorium Hohenpeißenberg des Deutschen Wetterdienstes etwa seit 1970 eine Wetterradaranlage. Ziel der im Folgenden kurz beschriebenen Untersuchung, die am Institut für Wasserbau III der Universität Karlsruhe in Zusammenarbeit dem Observatorium Hohenpeißenberg durchgeführt wurde, war es, durch Anwendung der Ergebnisse der Radarniederschlagsmessung auf die Abflußvorhersage und Vergleich der berechneten und gemessenen Abflußganglinien, auf die Genauigkeit der Radarmessung rückzuschließen. Bei positivem Ausgang der Untersuchung steht dann ein erfolgversprechendes Verfahren zur

direkten Hochwasservorhersage zur Verfügung.

### 2. Durchführung der Untersuchungen

In der Nähe des Radarstandpunktes südlich von München befinden sich zwei kleine mit Pegeln versehene Einzugsgebiete, für welche die Berechnung erfolgten:

Windach	Pegel: Obermühlhausen	$F = 34 \text{ km}^2$
Rott	Pegel: Raisting	$F = 55 \text{ km}^2$

Bevor unter Abschnitt 3. die Ergebnisse dargestellt werden können, soll kurz die Niederschlagsmessung und das hydrologische Modell beschrieben werden.

#### 2.1 Die Niederschlagsmessung

Da die "wahren Werte" des Niederschlags unbekannt sind, können nur verschiedene Meßmethoden verglichen werden, von denen 3 in den beiden gewählten Einzugsgebieten möglich sind. Abb. 4 zeigt die Lage der Gebiete und die Meßnetze.

##### 1. Meßnetz des Deutschen Wetterdienstes:

Bei Verwendung von Thiessen-Polygonen haben 3 vorhandene Regenschreiber Einfluß auf die Einzugsgebiete. Weiter befinden sich etwa 10 täglich abgelesene Hellmannsche Regenmesser im Großraum des Meßgebietes. Die Dichte beträgt ungefähr: 1 Regenmesser pro  $80 \text{ km}^2$   
1 Regenschreiber pro  $500 \text{ km}^2$

##### 2. Sondermeßnetz des Observatoriums Hohenpeißenberg:

Es wurde zu Forschungszwecken seit 1967 aufgebaut und zählt zu den dichtesten Meßnetzen dieser Art in Europa. Auf das nähere Meßgebiet entfallen etwa 20 Regenschreiber. Die Dichte beträgt  
1 Regenschreiber pro  $25 \text{ km}^2$   
(im engen Einzugsgebiet  $10 \text{ km}^2$ )

##### 3. Radarniederschlagsmessung des Observatoriums Hohenpeißenberg:

Die Messungen erfolgten bisher mit einem Gerät von 3,2 cm Wellenlänge (x-Band) und 75 KW Leistung. Das Meßprinzip ist folgendes: Vom Radargerät wird ein stark gebündelter Strahl elektromagnetischer Wellen ausgesandt, von Niederschlagströpfchen zum Teil reflektiert, und die von der Antenne wieder empfangene Energie quantitativ gemessen. Durch Drehung der Antenne um die senkrechte Achse werden die Niederschlagsfelder rund um den Gerätestand erfaßt und treten als unterschiedlich hell erscheinende Flächen auf dem Schirm auf.

Die Auswertung erfolgte in Hohenpeißenberg bisher halbautomatisch durch Fotografieren des Schirmbildes in 10 Dämpfungsstufen, Berechnung der Radargleichung und Korrektur der Absorption. Den genauen Ablauf gibt Attmannspacher und Aniol (1971) sowie Attmannspacher u.a. (1974) wieder. Entscheidend am benutzten Verfahren ist die Aneichnung an einen nahegelegenen Regenschreiber. Sie ist notwendig, da das "Tropfenspektrum" des Regens (Verteilung der Tropfendurchmesser), welches einen bedeutenden Einfluß auf die Wellenrückstrahlung hat, unbekannt und variabel ist, und da weitere Unsicherheiten in der Elektronik des Geräts enthalten sind. Zu dieser Aneichnung sind nur wenige direkt verbundene Regenschreiber notwendig.

Trotzdem traten durch sehr große Absorption bei Starkregen, durch Niederschlag in fester Form und andere Störquellen Verfälschungen auf, die mitunter eine genaue Radarmessung unmöglich machten. Für zukünftige Untersuchungen wird auf dem Hohenpeißenberg ein 5,4 cm Radar (C-Band) aufgestellt, das sowohl vollautomatisiert ist, als auch eine wesentlich geringere Absorption durch Niederschlag aufweist. Dieses Gerät kann dann zur echten Vorhersage eingesetzt werden. Für die bisherigen Untersuchungen wurde die Vorhersage theoretisch nachvollzogen, was für die Beantwortung der wichtigsten Fragen ausreicht. Es ist allerdings zu beachten, daß wegen der Einschränkungen des alten Radargeräts - auch durch den nicht optimalen elektronischen Aufbau - nur wenige radargemessene Ereignisse vorliegen, die zu ausreichenden Hochwasserwellen führten.

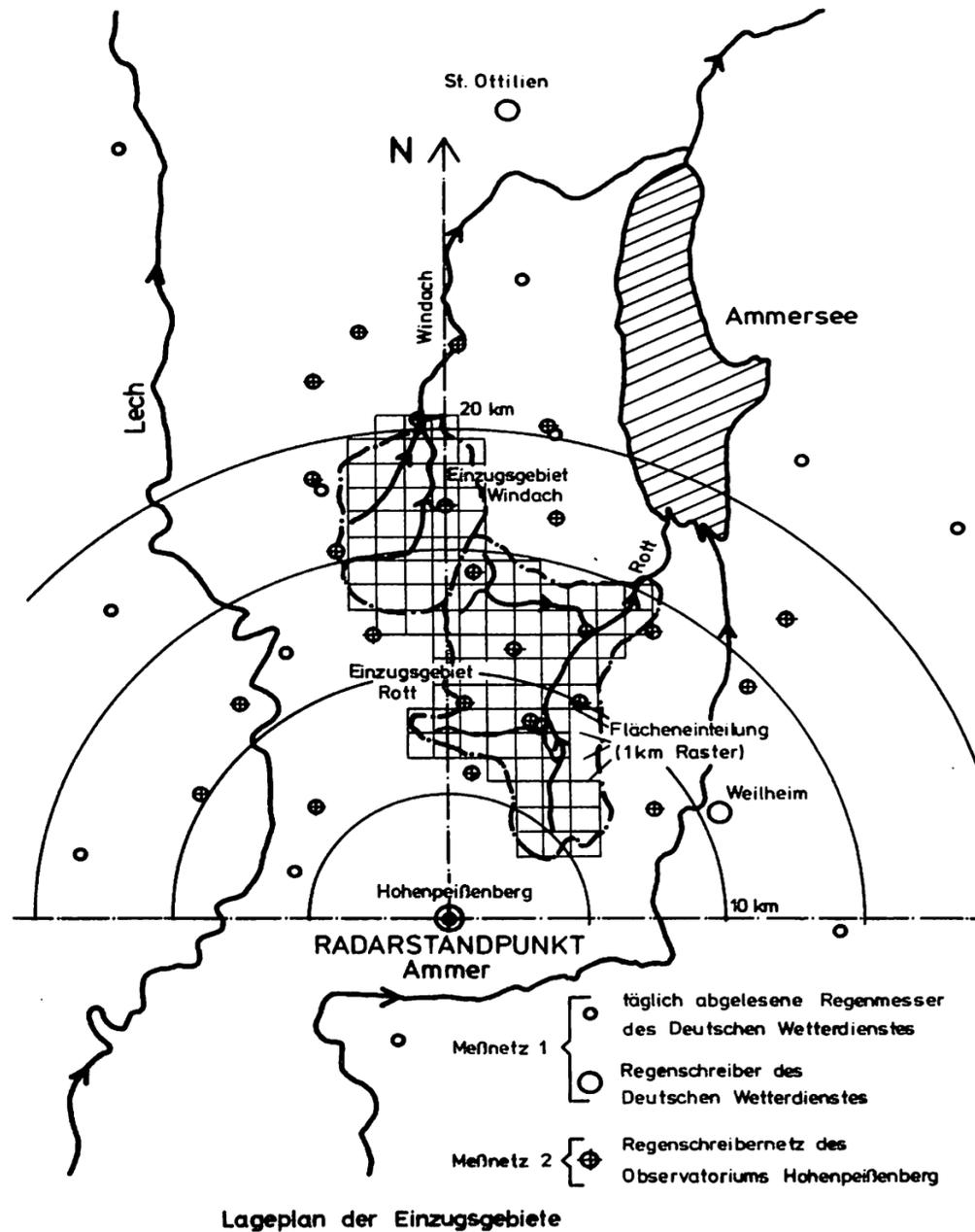


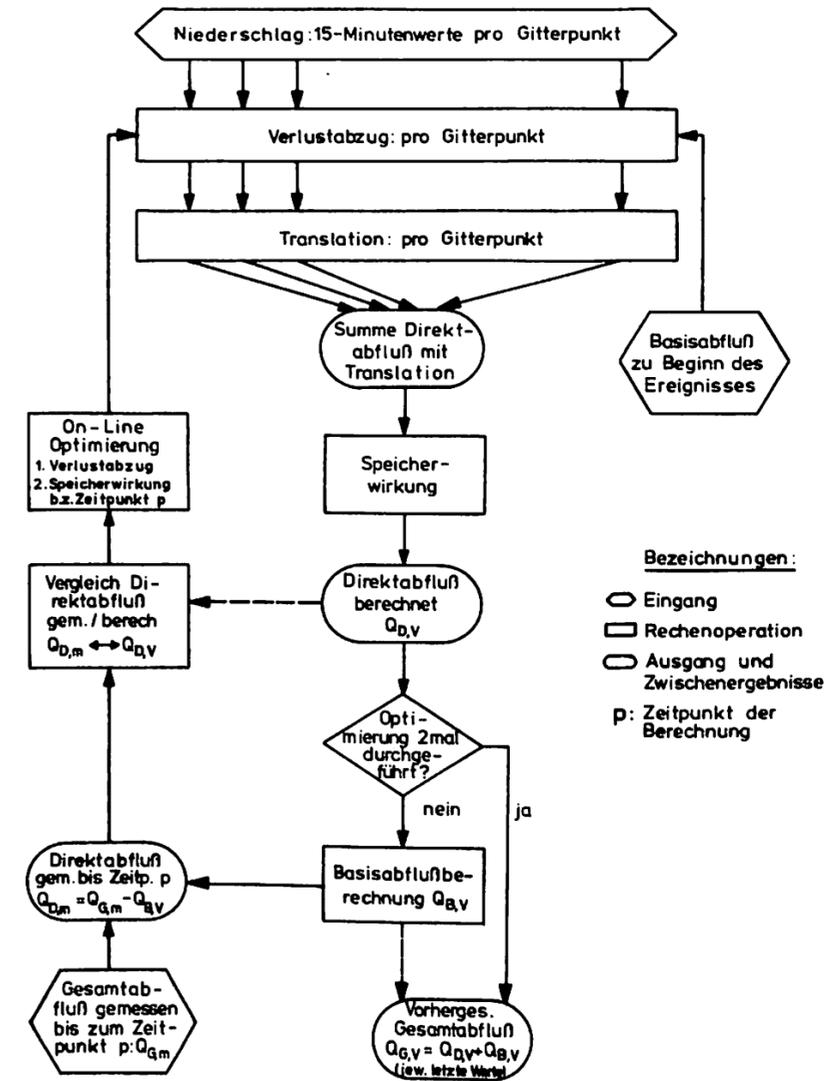
Abb. 4

2.2 Das Hydrologische Modell

Trotz der Vielzahl bestehender Modelle existierte kein hydrologisches Modell, das die geforderte Fragestellung ohne große Änderungen hätte lösen können. Aus diesem Grunde wurde ein Modell entwickelt, welches zum Teil bekannte Bausteine enthält, zum Teil neue Ansätze macht. Sein Aufbau kann hier nur grob beschrieben werden. Näheres ist ersichtlich bei Anderl (1975).

Die wichtigsten Grundforderungen an das Modell lauten: Flächenmäßig verteilter Aufbau, da auch die Radarmeßwerte pro Flächeneinheit diskretisiert sind (Quadrate mit  $1 \text{ km}^2$ ; siehe Abb. 4. Und: Vorhersage der Verlustrate beim Beginn des Niederschlags. Abb. 5 zeigt das Fließdiagramm des hydrologischen Modells:

Während die Ganglinien des radargemessenen Regens pro Gitterpunkt (Quadrat) direkt vorliegen, müssen für die Vergleichsrechnung mit dem herkömmlichen Meßnetz dessen Werte vorher auf das Gitter interpoliert werden. Das geschieht durch ein räumliches Polynom über den Regengesamtsummen der Regenmesser und durch



Fließdiagramm des hydrologischen Modells

Abb. 5

Thiessenpolygone um die vorhandenen Regenschreiber zur zeitlichen Verteilung, wie es Schultz (1968) entwickelte. Zur Aufteilung des Niederschlags in Verluste und Effektivniederschlag wurde folgender Ansatz hergeleitet:

$$r_{\text{eff}}(t) = r(1 - e^{-a \cdot \int_0^t r dt}) \cdot c \quad [1]$$

wobei vorher ein Anfangsverlust  $A_V$  abgezogen wird.

- $r(t)$  = Niederschlag
- $r_{\text{eff}}(t)$  = Effektivniederschlag
- $a, c, A_V$  = Parameter

Gl. [1] stellt einen, proportional der bis zum jeweiligen Zeitpunkt  $t$  gefallenen Regensumme, prozentualen Ansatz dar, der sich am Ende eines starken Regens dem maximalen Grenzabflußbeiwert  $c$  nähert. Der Vorteil des Ansatzes liegt darin, daß Gl. [1] für ein Gesamt ereignis integriert werden kann. Dadurch lassen sich dann bei vielen bekannten Ereignissen Regressionen über die Gesamtsummen aufstellen und daraus Gleichungen für die Vorhersage der Verlustparameter  $A_V, a, c$  für jedes Ereignis gewinnen. Als günstig wurde so gefunden:

$$\begin{aligned} A_V &= P_1 + P_2 \cdot Q_{B,A} \\ a &= P_3 \cdot Q_{B,A} \\ c &= P_4 \end{aligned} \quad [2]$$

- $Q_{B,A}$  = Basisabfluß zu Beginn des Ereignisses
- $P_1, P_2, P_3, P_4$  = gebietsspezifische Parameter (gleich für alle Gitterpunkte)

Der Basisabfluß  $Q_{B,A}$  erwies sich hierin als einfaches Maß für die bestehende Bodenfeuchtigkeit, die wiederum die Versickerung maßgebend beeinflusst.

Den Abflußprozess bildet die Translation und Speicherwirkung nach. Daß dieser Ansatz sinnvoll ist, läßt sich sowohl durch die Literatur (z.B. Dooge, 1959; Schröder 1974), als auch durch eigene Untersuchungen begründen. Hierbei ergab sich, daß jeder Gitterpunkt des Einzugsgebietes (Abb. 4) eine verschiedene Translationszeit zum Pegel besitzt, daß man jedoch mit guter Näherung eine für alle Punkte gleiche Speicherwirkung annehmen kann. Während das im Grundaufbau ähnliche Hyreun-Modell von Schultz (1968) jedoch die Speicherwirkung durch einen einparametrischen, analytischen Speicheransatz erfaßt, kommt hier eine an 1 Stützstellen gegebene Übertragungsfunktion für Speicherwirkung zum Einsatz. Ebenso wie die Einheitsganglinie ergibt sie durch die Faltungoperation Gl. [3] den Abfluß, jedoch ist der Effektivregen als Eingang schon um die Translationszeit verschoben.

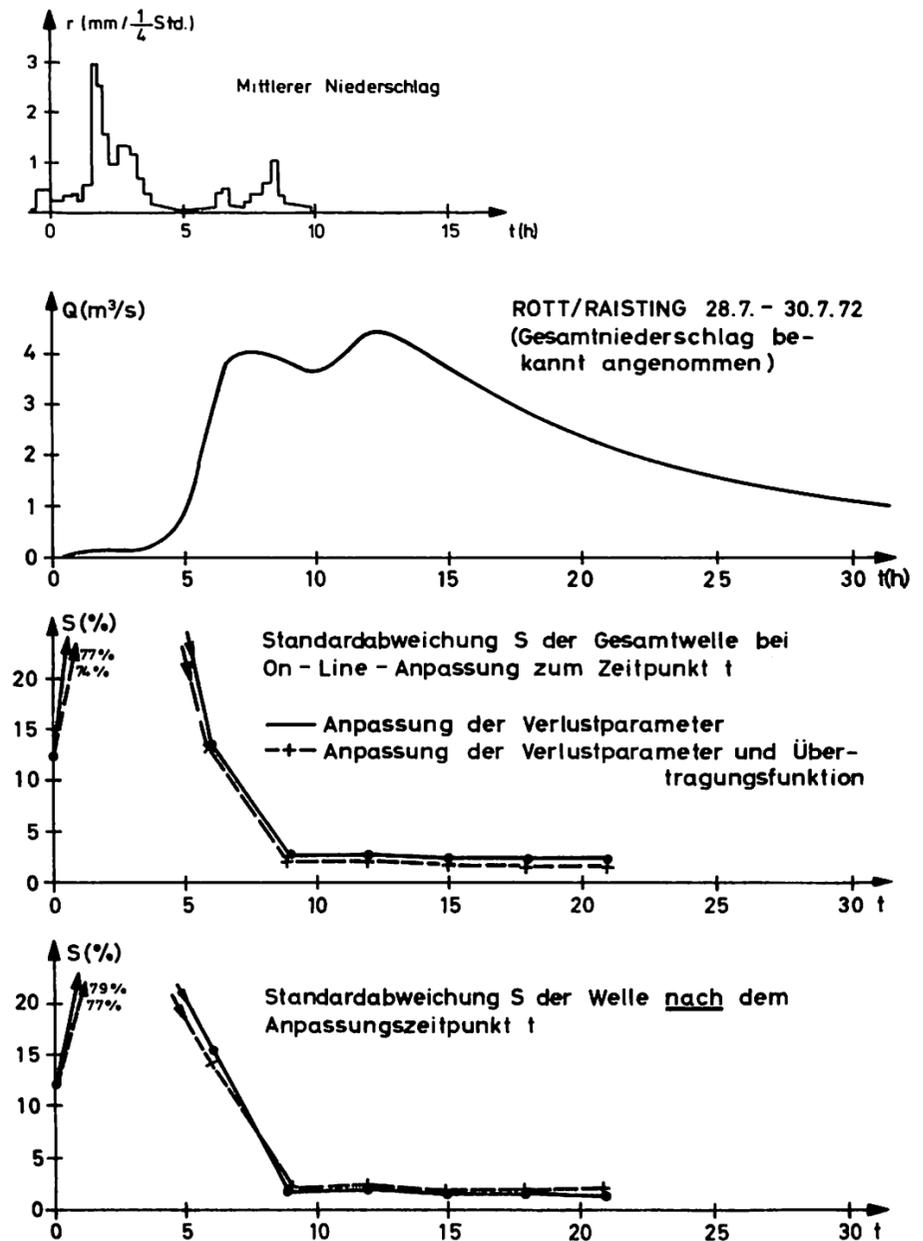
$$Q_i = \sum_{k=1}^i \hat{r}_k \cdot h_{i-k+1} \cdot \Delta t \quad [3]$$

- $Q_i$  = Direktabflußganglinie
- $\hat{r}_k$  = Effektivniederschlag mit Translation über alle Quadrate aufsummiert
- $h_i$  = mittlere Übergangsfunktion für Speicherwirkung

Der Basisabfluß wird über empirische Regressionsbeziehungen zum Direktabfluß vorhergesagt und bildet zusammen mit diesem den Gesamtabfluß.

Während eines Ereignisses (Zeitpunkt  $p$ ) erfolgt laufend die Korrektur eines Teils der Modellparameter durch den Vergleich des bis dahin gemessenen Direktabflusses und des vorhergesagten Direktabflusses. Diese Operation bietet sich an (siehe z.B. Hino, 1973), da es sich bei der praktischen Vorhersage immer um einen "On-Line"-Prozess handelt, und somit die bis zum Zeitpunkt  $p$  zur Verfügung stehende Information vollständiger ausgenutzt wird. Es ergab sich, daß durch die adaptive Verbesserung der Verlustparameter die Vorhersagegenauigkeit während des Ereignisses wesentlich gesteigert werden kann. Eine ereignisabhängige Korrektur der mittleren Übertragungsfunktion für Speicherwirkung erwies sich nur bei wenigen

Extremereignissen als notwendig. Da Basisabfluß und Direktabfluß nur als Summe gemessen werden können, ist eine Iterationsschleife erforderlich (Abb. 5). An der Beispielwelle von Abb. 6 (hier ohne Basisabfluß) wurden laufend adaptive Korrekturen durchgeführt und die Entwicklung der Abweichung (s. Abschn. 3) von der gemessenen Welle aufgezeichnet. Es ist typisch, daß etwa ab dem Wendepunkt des ersten ansteigenden Astes gute Ergebnisse mit der Anpassung erzielt werden können.



Entwicklung der Berechnungsgenauigkeit bei laufender Anpassung

Abb. 6

3. Ergebnisse

Zur Beurteilung der Güte der Ergebnisse dient als Abweichungskriterium für die berechneten Wellen von den gemessenen Wellen die bezogene Standardabweichung S.

$$S = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{ri} - Q_{mi})^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{100}{Q_{mm}} \% \quad [4]$$

- $Q_{mi}$  = gemessener Abfluß zum Zeitpunkt i (n Werte)
- $Q_{ri}$  = berechneter Abfluß zum Zeitpunkt i (n Werte)
- $Q_{mm}$  = maximaler gemessener Abfluß des Ereignisses

3.1 Vergleich der Ergebnisse des hydrologischen Modells anhand von Eingabedaten aus Konventioneller und Radar-Niederschlagsmessung

Wie in Abschnitt 2.1 erwähnt, stehen bisher nur wenige gemessene Radarereignisse zur Verfügung. Sie sind in Tab. 1 aufgeschrieben:

Tab. 1: Radargemessene Hochwasserereignisse

Nr.	Datum	ROTT		WINDACH	
		Gesamt-regen R (mm)	Direkt-abfluß $R_{eff}$ (mm)	Gesamt-regen R (mm)	Direkt-abfluß $R_{eff}$ (mm)
1	30.6.71	21,5	3,1	24,0	1,9
2	24.7.71	-	-	19,6	1,3
3	28.7.72	21,0	5,3	19,8	1,5
4	16.8.72	23,8	1,7	35,8	12,6
5	9.7.73	-	-	32,9	1,0
6	25.7.73	-	-	8,4	1,1

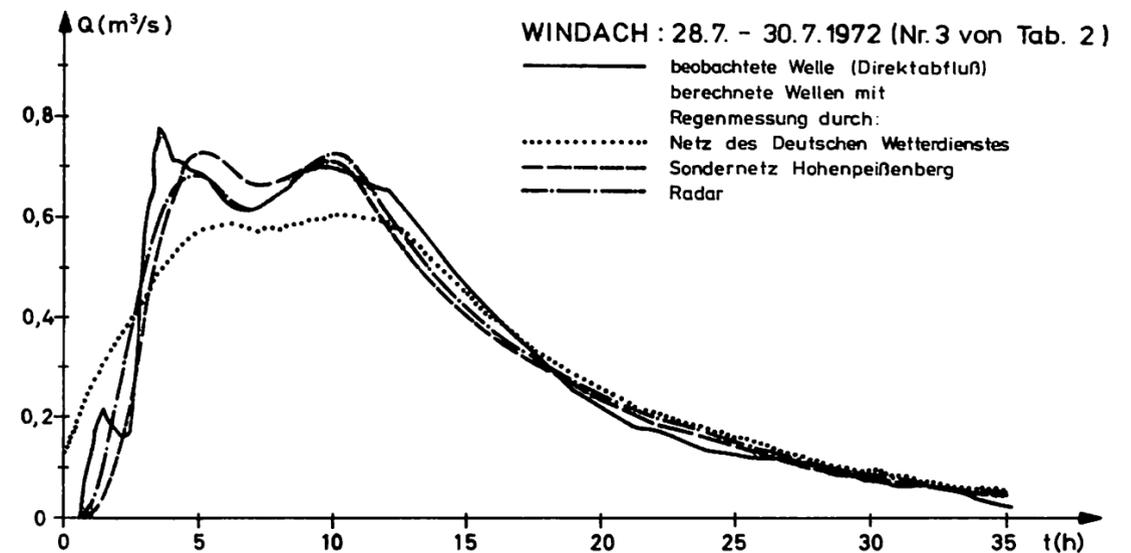
Für diese Ereignisse sind auch Messungen der beiden konventionellen Niederschlagsmeßnetze vorhanden, so daß mit dem hydrologischen Modell für alle 3 Meßmethoden (Abschn. 2.1) die Hochwasserwellen berechnet und über das Vergleichskriterium von Gl. [4] mit der gemessenen Welle verglichen werden konnten. Zuerst erfolgte die Berechnung mit bekannt angenommenem Regen ohne Basisabfluß und mit ereignisoptimierten Verlustparametern und lieferte die in Tab. 2 dargestellten Ergebnisse.

Tab. 2: Standardabweichung S (%) Gl. 4 für 3 Niederschlagsmeßverfahren als Eingang für die Wellenberechnung (optimale Werte)

Ereignis Nr.	ROTT Niederschlagsmessung			WINDACH Niederschlagsmessung		
	1	2	3	1	2	3
	1	4,28	4,63	5,46	4,75	5,23
2	-	-	-	12,82	14,87	9,14
3	9,07	2,94	2,36	9,41	6,43	5,68
4	17,47	11,20	9,10	9,38	5,21	3,86
5	-	-	-	8,76	15,43	8,20
6	-	-	-	31,51	9,22	14,01
Mittel $S_m$	10,27	6,26	5,64	12,77	9,40	7,91

- 1 = Meßnetz des Deutschen Wetterdienstes
- 2 = Sondermeßnetz des Obs. Hohenpeißenberg
- 3 = Radarniederschlagsmessung

Beide Einzugsgebiete zeigen die gleiche Tendenz: Das Meßnetz des Deutschen Wetterdienstes ist dem Sondermeßnetz und der Radarmessung stark unterlegen. Zwischen letzteren 2 Methoden kann wegen der kleinen Stichproben eine Oberlegenheit der Radarmessung nicht als sicher vorausgesetzt werden. Abb. 7 zeigt ein Beispiel von der Windach.



Optimal angepaßte Hochwasserwellen mit 3 Niederschlagsmeßverfahren

Abb. 7

Ebenso durchgeführte Vergleichsberechnungen mit vorhergesagten (Gl. [2]), für alle 3 Meßmethoden gleichen Verlustparametern brachten qualitativ die gleichen Ergebnisse, wobei die Abweichungen erwartungsgemäß deutlich höher lagen (ca. Faktor 2). Durch adaptive Anpassungen kann jedoch die Genauigkeit gesteigert werden, wie der folgende Abschnitt zeigt.

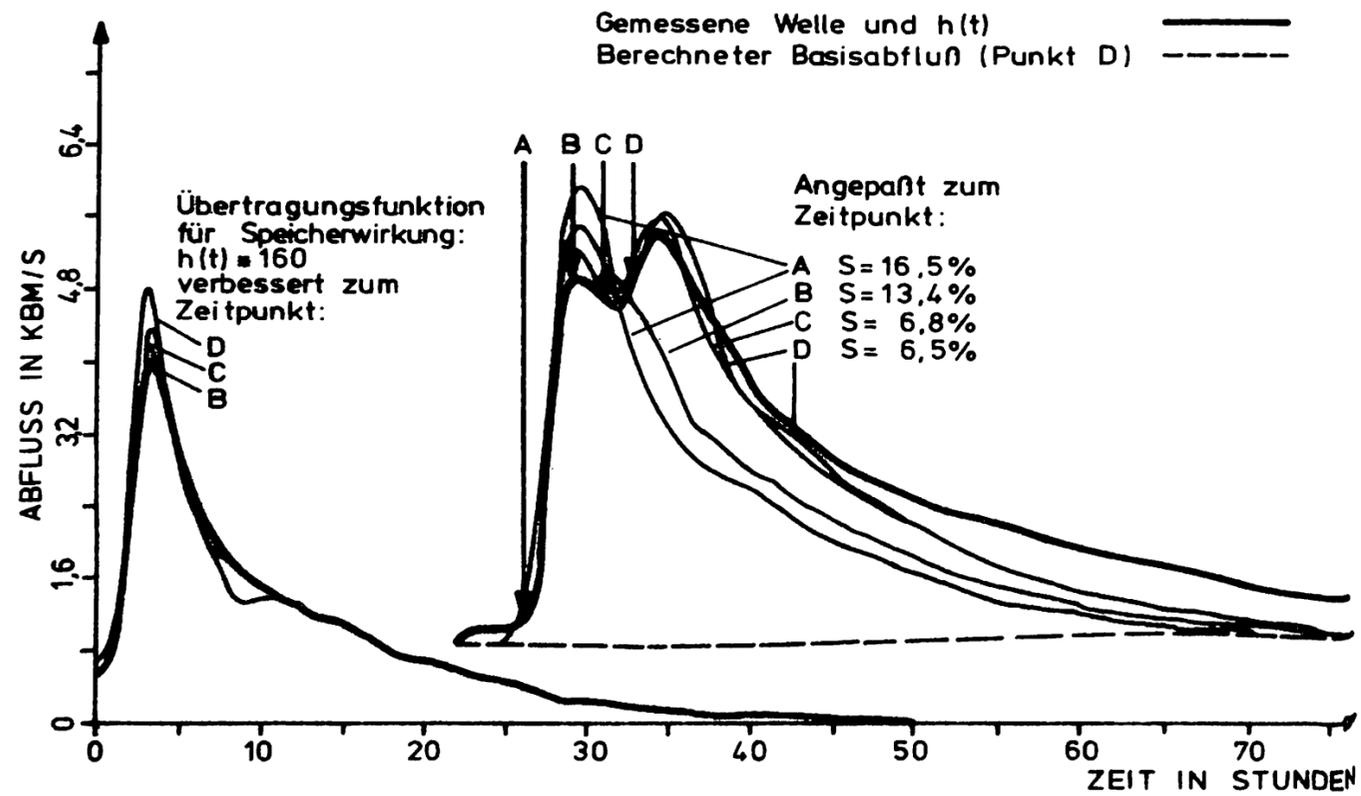
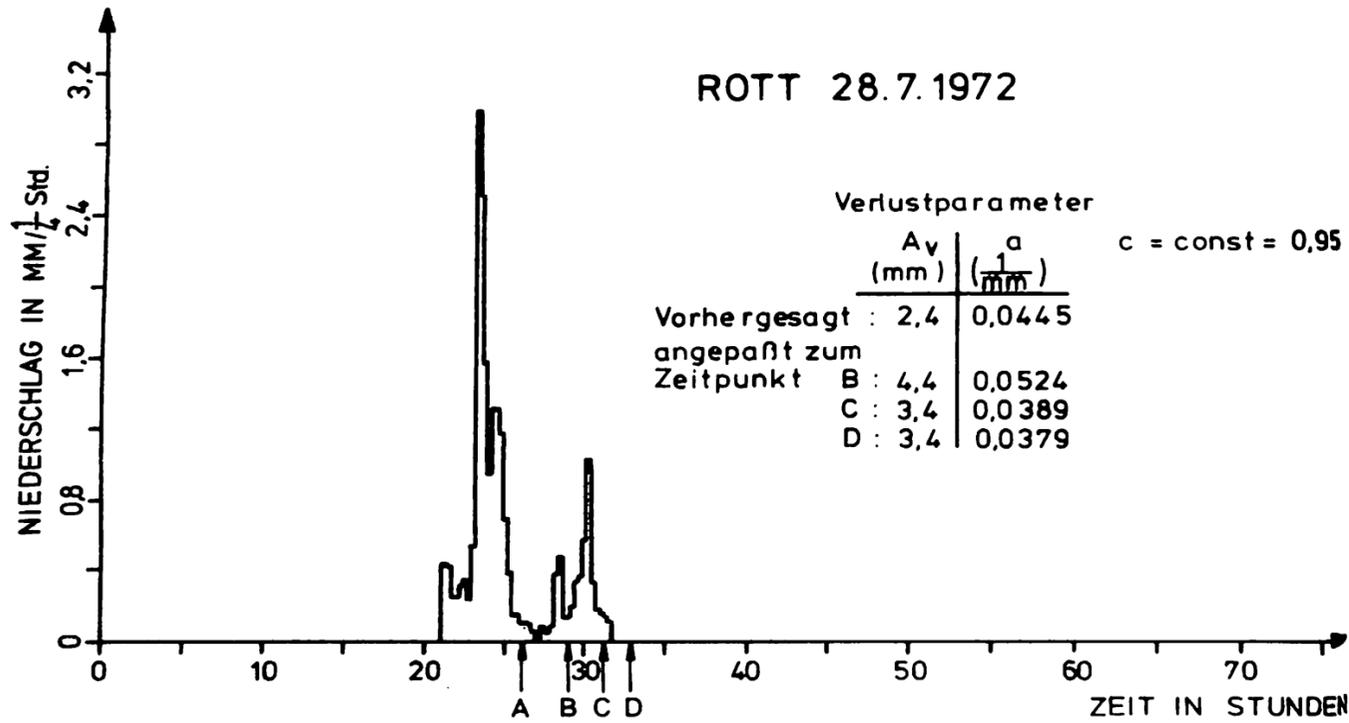
3.2 Vorhersage von Hochwasserganglinien aus Radarniederschlagsmessung mit adaptiver Verbesserung

Da der Vergleich die Eignung der Radarniederschlagsmessung bestätigte, konnten nun echte Vorhersagebeispiele durchgerechnet werden. Abb. 8 zeigt ein Ereignis bei dem an den Punkten A, B, usw. laufend Vorhersagen gemacht wurden, wobei Niederschlag und Abflußwelle nur bis zu diesem Zeitpunkt als bekannt angenommen sind.

Wie leicht ersichtlich ist, besteht eine umgekehrt proportionale Beziehung zwischen Vorhersagezeit und Genauigkeit der Vorhersage, die in ähnlicher Weise bei allen Ereignissen auftritt. Bei diesen kleinen Einzugsgebieten bewegt sich der Absolutwert der Vorhersagezeit erwartungsgemäß im Bereich von einigen Stunden. Bei größeren Gebieten, die sich ev. aus mehreren Teileinzugsgebieten zusammensetzen können, steigt diese Zeit an.

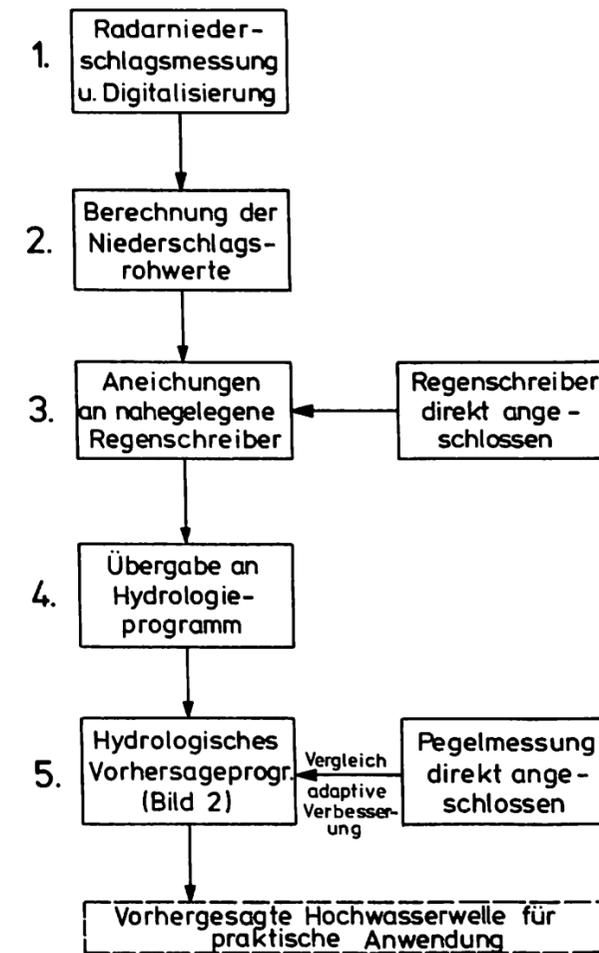
Grundsätzlich ergibt sich aus den Untersuchungen von Abschnitt 3 (Details s. Anderl, 1975) eine Eignung des Wetterradars zur quantitativen Niederschlagsmessung und zur Hochwasservorhersage. Man muß jedoch beachten, daß bisher die Meßgenauigkeit bei Hagel und Schnee stark abnimmt bzw. keine ausreichenden Untersuchungen hierrüber vorliegen. Weiterhin sind vor einer zweckorientierten Anwendung der Radarniederschlagsmessung in der Hydrologie mehr Messungen als bisher notwendig, um die hier gemachten Feststellungen statistisch untermauern zu können und um durch Simulation oder durch statistische Aussagen die Anwendung (z.B. zur Speichersteuerung) zu prüfen. Mit einem vollautomatisierten Meß- und Berechnungsablauf wird dies schon in Kürze möglich sein. Für diesen Ablauf, wie er in Abb. 9 eingezeichnet ist, genügt ein relativ kleiner Computer, der allerdings Speichereinheiten (z.B. Plattenspeicher) benötigt.

Nach Klärung weiterer technischer Details, wie z.B. adäquate Wahl des Zeitintervalles, nach dem Aneichungen an die Regenschreiber möglich sind, und der erforderlichen Anzahl der Eichgeräte, ist eine Wirtschaftlich-



**Vorhersage zu verschiedenen Zeitpunkten (Rott 3)**

Abb. 8



**Ablaufschema der Hochwasserganglinien - Vorhersage aus Radarniederschlagsmessung**

Abb. 9

keitsuntersuchung möglich. Diese Untersuchung muß anhand eines konkreten Projekts die kostenmäßigen Unterschiede zwischen der Radarmessung und der Messung mit einem entsprechenden Punktnetz feststellen. Ziel der Arbeit war es u.a. hierfür Grunddaten zu liefern. Zum Schluß sei noch erwähnt, daß eine Wirtschaftlichkeitsstudie über den Radareinsatz für die Wasserwirtschaft in England zu einem positiven Ergebnis kam (Water Resources Board, 1973), das natürlich nicht ohne Prüfung übertragbar ist.

**4. Zusammenfassung**

Ziel der Untersuchung war es, die Anwendbarkeit der Radarniederschlagsmessung zur direkten Hochwasservorhersage in kleinen und mittleren Einzugsgebieten zu prüfen. Hierzu wurde ein hydrologisches Modell entwickelt, das nach Vorhersage der Verlustrate den Abfluß mit einem Translations-Speicheransatz ermittelt. Eine Berechnung mit drei verschiedenen Niederschlagsmeßmethoden und der Vergleich anhand von 9 gemessenen Abflußganglinien an zwei kleinen Einzugsgebieten südlich von München ergab: Die Radarmessung entspricht in der Genauigkeit etwa einem dichten Spezialmeßnetz mit ca. 25 km<sup>2</sup> pro Regenschreiber und ist deutlich besser als das normalerweise vorhandene Meßnetz des Deutschen Wetterdienstes (hier ca. 80 km<sup>2</sup> pro Regenmesser).

Durch adaptive Verbesserungen während des Ereignisses läßt sich die Vorhersagegenauigkeit steigern. Bisherige Schwierigkeiten mit der Radaranlage können zum Teil durch eine neue vollautomatische Anlage behoben werden, mit der echte On-Line-Vorhersagen möglich sind.

Die meisten Berechnungen wurden auf der Univac 1108 der Universität Karlsruhe ausgeführt. Die Verfasser bedanken sich beim meteorologischen Observatorium Hohenpeißenberg für die Radardaten und die gute Zusammenarbeit während der Untersuchungen. Insbesondere der persönliche Einsatz und die Beratung durch Herrn LtDR Direktor Dr. Attmannspacher hat sehr zum Gelingen der Untersuchung beigetragen. Dem Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft sind wir für die Überlassung der Pegelmeßdaten zu Dank verpflichtet.

#### Literatur:

- Anderl, B. Die Vorhersage von Hochwasserganglinien aus radargemessenem Regen. Dissertation, Institut für Wasserbau III, Universität Karlsruhe, 1975.
- Attmannspacher, W. Erste Versuche einer quantitativen Niederschlagsmessung mittels Radar am Hohenpeißenberg. Ann.Meteor., N.F., 5, S. 221-223, 1971.
- Attmannspacher, W. Hartmannsgruber, R. Riedl, J. Eine Methode zur halbautomatischen Flächenniederschlagsmessung mit einem X-Band-Radar. Arch.Met.Geoph.Biokl., Ser. B, 22, S. 27-38, 1974.
- Dooge, J.C.I. A General Theory of the Unit Hydrograph. J. of Geophysical Research, Vol. 64, No.2, S. 214-256, Feb. 1959.
- Hino, M. On-line Prediction of Hydrologic System. 15. IAHR Congress, Vol.4, S. 121-129, Istanbul 1973.
- Schröder, R.C.M. Detaillierte hydrologische Modelle für instationäre Niederschlag-Abfluß-Systeme. Die Bautechnik, Nr. 9, S. 301-306, 1974.
- Schultz, G.A. Bestimmung theoretischer Abflußganglinien durch elektronische Berechnung von Niederschlagskonzentration und Retention (Hyreun-Verfahren). Bericht Nr. 11 des Inst.f.Wasserbau und Wasserwirtschaft der TH München, Jan. 1968.
- Water Resources Board Dee Weather Radar Project. The use of a Radar Network for the Measurement, and Quantitative Forecasting of Precipitation. Report by the Operations Systems Group, Reading, England, 1973.

## 1. DISKUSSION

### Cehak:

Wie weit kann man Radarmessungen des Niederschlags ohne Sondernetz durchführen, oder wie weit kann man die Maschenweite auseinanderziehen?

### Attmannspacher:

Man braucht nur eine repräsentative Aneichstation (aus Sicherheitsgründen 2 Ombrometer). Das Niederschlags-sondernetz dient nur Vergleichszwecken. Für die eigentliche Radarmessung ist ein solches Netz nicht notwendig.

Die Frage, ob eine oder mehrere Aneichstationen nötig sind, ist auch eine Frage der Größe des zu überwachenden Gebietes. Wir haben jetzt für ca. 1 000 km<sup>2</sup> Testfläche eine Vergleichsstation.

### Ginsburg:

Wurden die Ergebnisse dieser Arbeit mit einer ähnlichen Untersuchung jugoslawischer Hydrologen verglichen, über die auf der VII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen berichtet wurde?

Welche Vorzüge hat Ihre Radaranlage gegenüber örtlichen Regenmessern, die in vielen Ländern verwendet werden?

### Attmannspacher:

Die Arbeiten der jugoslawischen Kollegen sind uns leider nicht bekannt. Ich würde mich sehr freuen, wenn ich hierüber mehr erfahren könnte.

Die Lage des Hohenpeißbergs - ein freistehender Berg im Alpenvorland - ist für elektronische Messungen ideal. Es kann mit einem Abstrahlwinkel von 0° horizontal gemessen werden. So werden die Niederschlagsteilchen meist im Bereich zwischen der Wolkenuntergrenze und dem Boden erfaßt.

Eine noch so genaue, konventionelle Niederschlagsmessung an einem Ort gestattet nur ganz bedingt eine Aussage über die Flächenniederschläge. Letztere können aber vom Radargerät gemessen werden.

### Nemec:

In dem interessanten Beitrag von Kresser und Gutknecht wurde die Formel für die Fehlerberechnung benützt, wie sie in Kapitel 5 angegeben ist. Welches  $Q_{beob}$  benutzen Sie für Fehler in den beobachteten Daten?

### Kirnbauer:

Für die Berechnung des Streuungsverhältnisses nach der zitierten Formel wurde bis zur Einbeziehung des Modells für den Basisabfluß (Berechnungsschritt 7, Abb. 4) der Direktabfluß verwendet, der sich aus der Abtrennung des Basisabflusses bei der Eichung des UNIT-HYDROGRAPH ergibt.

Für die Berechnung des UNIT-HYDROGRAPH ist ja schon im Berechnungsschritt 1 der Abb. 4 eine Trennung in Direktabfluß und Basisabfluß notwendig. Bis Schritt 6 muß dieser berechnete Direktabflußganglinie als "beobachtet" angesehen werden.

### Parschin:

Was kann man über die praktische Zuverlässigkeit und Effektivität der Methoden kurzfristiger hydrologischer Prognosen in den Donaustaaten sagen?

Нладны:

Зур Zeit ist es noch unmöglich zu sagen, in welcher Richtung die Forschungsarbeiten in den Donauländern gehen werden. Ich kenne einige Arbeiten sowjetischer Spezialisten; ebenso sind mir die Bestrebungen in der Tschechoslowakei zu diesem Thema bekannt. Ich halte die erreichten Resultate, die die Effektivität prognostischer Methoden und individueller Vorhersagen betreffen, für noch nicht zufriedenstellend. Allgemein kann man aber sagen, daß man die Auswahl der Daten für die Genauigkeitsanalyse unbedingt präzisieren muß und daß den Fragen der Auswertung und der wirtschaftlichen Effektivität der Prognosen große Aufmerksamkeit schenken muß.

1. Д И С К У С С И ЯЦехак

Как далеко можно проводить радарные измерения осадков без особой сетки, или как далеко можно растянуть длину квадрата координатной сетки?

Аттманнспахер:

Требуется лишь репрезентативная проверочная станция (из соображений безопасности 2 дождемера). Особая дождемерная сетка служит лишь для целей сравнения. Для непосредственного радарного измерения такая сетка не требуется.

Вопрос о необходимости одной или нескольких проверочных станций, есть также вопрос о величине контролируемой области. Мы имеем сейчас на испытательной площади в приблизительно 1 000 км<sup>2</sup> одну станцию сравнения.

Гинабург:

Сравнивались ли результаты этой работы с аналогичным исследованием югославских гидрологов, которое было доложено на VII конференции?

Имеет ли Ваша радарная установка преимущества перед метеорологическими локаторами, применяемыми во многих странах?

Аттманнспахер:

Работы югославских коллег нам, к сожалению в подробностях неизвестны. Я буду очень рад узнать об этом побольше.

Расположение Гогенпейсенберга - свободностоящая гора в предгорье Альп - является идеальным для электронных измерений. Измерения можно проводить под углом излучения в нуль градусов от горизонтали. Таким образом охватываются осадковые частицы в области от нижней границы облаков до поверхности земли.

Даже очень достоверное измерение количества осадков в одном месте допускает лишь вполне условное высказывание об осадках на площади. Последнее, однако, можно измерить радарным устройством.

Немец:

В интересной статье Крессера и Гуткнехта используется формула для вычисления погрешностей в том виде, в каком она дана в главе 5. Какое  $Q_{\text{набл}}$  использовали Вы для погрешностей данных наблюдений?

Кирнбауэр:

Для расчета коэффициента рассеяния по цитированной формуле был использован, вплоть до приобщения модели для базисного стока (расчетный шаг 7, рис.4), непосредственный сток, который получается вследствие разделения базисного стока при выверке юнит-гидрографа.

Для расчета юнит-гидрографа уже в расчетном шаге 1, рис.4, необходимо разделить непосредственный сток и базисный сток. До расчетного шага 6 необходимо рассматривать эту расчетную линию как "наблюдение".

Паршин:

Что можно сказать о практической надежности и эффективности методов гидрологических краткосрочных прогнозов в придунайских странах?

Хладны:

Сейчас невозможно еще сказать, какое направление будет исследовано вообще во всех придунайских странах. Я знаю некоторые работы советских специалистов, мне известны также стремления в Чехословакии по этой теме. Я считаю достигнутые результаты, касающиеся эффективности прогностических методов и индивидуальных прогнозов, еще неудовлетворительными. В общем считается, что необходимо уточнить выбор данных для анализа точности и большое внимание надо уделять вопросам использования и экономической эффективности прогнозов.

ERFAHRUNGEN MIT DEM KALININ-MILJUKOW-VERFAHREN AN EINEM  
TEILSTOCK DER ÖSTERREICHISCHEN DONAUSTRECKE

R. Kirnbauer

ПРИОБРЕТЕНИЕ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДА КАЛИНИНА-МИЛЮКОВА  
ОПЫТЫ НА ОДНОМ ИЗ АВСТРИЙСКИХ УЧАСТКОВ ДУНАЯ

Р. Кирнбауер

Zusammenfassung:

In der vorliegenden Arbeit wird die Verwendbarkeit des Kalinin-Miljukow-Verfahren zur Prognoseerstellung an der Donaustrecke Ybbs/Krems-Wien untersucht.

Das angewendete Rechenverfahren basiert auf dem Speicher-Kaskaden-Modell nach Nash.

Um den durch die Überschwemmungsräume im Tullner Feld gegebenen Verhältnissen Rechnung zu tragen, wurde ein zweistufiges Modell gewählt, das eine getrennte Berechnung für den Abfluß im Flußschlauch und in den Vorländern ermöglicht.

Abgehend von der bisherigen Praxis wurde im Falle der Ausuferung nicht mit einem vom Gesamtabfluß unabhängigen, konstanten Wert des Abflusses im Flußschlauch gerechnet, sondern die Parameter des Vorland-Abflusses nur auf jenen Abflußanteil angewendet, der tatsächlich durch die Vorländer abfließt.

Die Eichung der Parameter erfolgte anhand von beobachteten Wellen, wobei sowohl Ereignisse mit vernachlässigbar kleinem Einfluß der Zubringer als auch solche mit deutlichem Zubringereinfluß herangezogen wurden.

Hierbei zeigte es sich, daß die Genauigkeit der Wiedergabe der Meßwerte durch das Rechenverfahren im wesentlichen nicht von den Parametern des Kaskaden-Modells (Speicherzahl und Speicherkoeffizient) einzeln, sondern von deren Produkt - deutlich als die Fließzeit der Welle - abhängt.

Anschließend an eine Untersuchung der Empfindlichkeit des Modelles auf unabhängige Änderung der einzelnen Parameter wurde ein Vergleich des Verfahrens mit einem einfachen Regressions-Modell durchgeführt.

Резюме:

В настоящей работе изучается применимость метода Калинина-Милюкова при составлении прогнозов на участке Дунай Ибс - Кремс - Вена.

Применяемый способ расчета основан на модели каскадного аккумуляирования по Нэшу.

В целях учета данных, полученных из районов затопления в Тульнском поле и, существующих там условий, была выбрана двухступенчатая модель, позволяющая производить отдельный расчет расходов в рукаве реки и в затопленных частях поймы.

В отклонении от имеющейся до сих пор практики, в случае половодья расчет производится не с помощью независимого от общего расхода постоянного значения для расхода воды в рукаве реки, а параметры расходов заполняемых частей применялись только для той доли расхода, которая фактически проходит по этим заполняемым частям.

Тарировка параметров производилась на основании наблюдения волн, причем в равной мере привлекались события с ничтожным и со значительным влиянием притока. При этом выяснилось, что точность передачи измеренных при помощи расчетного способа значений, зависит в основном не от параметров отдельной модели (количества водохранилищ и аккумуляторного коэффициента), а от их суммы - понимаемой в смысле продолжительности протекания волны.

После проведения исследования чувствительности модели по отношению к изменениям отдельных параметров было проведено сравнение метода с обычной аналитической моделью.

Für die deterministische Beschreibung des Ablaufes einer Hochwasserwelle im Fluß bietet sich einerseits ein detailliertes hydraulisch-mathematisches Modell an, andererseits die sogenannten "hydrologischen Verfahren" Muskingum-Methode (4) und Kalinin-Miljukow-Verfahren (7).

Das zuletzt genannte Verfahren wurde auf seine Anwendbarkeit zur Prognose-Rechnung zwischen Ybbs an der Donau, Stein-Krems und Wien untersucht. Auf dieser Strecke zeigt die Donau zwei extrem unterschiedliche Regime-Formen: zwischen Ybbs und Stein-Krems das enge Durchbruchstal der Wachau, das praktisch keine Reten-

tionsräume enthält, zwischen Stein-Krems und Wien das Tullner Feld, dessen ausgedehnte Auwälder bei extremen Hochwässern weithin überschwemmt werden, was zu einer deutlichen Reduzierung der Hochwasserspitzen führt. Während der Donauabfluß zwischen Stein-Krems und Wien nur durch verhältnismäßig kleine Zubringer verändert wird, die nur bei extremen Hochwasserlagen eine Veränderung der Form der Donau-Welle bewirken, münden zwischen Ybbs und Stein-Krems die Ybbs und die Erlauf, deren Einfluß im allgemeinen nicht zu vernachlässigen ist.

Wenn es beim Kalinin-Miljukow-Verfahren auch prinzipiell möglich ist, den Einfluß von Zubringern zu berücksichtigen, so wurde in der vorliegenden Untersuchung von dieser Möglichkeit nicht Gebrauch gemacht, um die Zahl der Modellbausteine nicht zu vermehren.

Wie die Ergebnisse zeigen, ist diese Vernachlässigung allerdings im allgemeinen - speziell auf der Strecke Ybbs-Stein - nicht zulässig.

Anmerkungen zum Kalinin-Miljukow-Verfahren

Wie auch die Muskingum-Methode geht das Kalinin-Miljukow-Verfahren von der Kontinuitätsgleichung und einer eindeutigen Beziehung zwischen dem Wasserstand  $h$  an einem Bezugspegel und dem im Flußbett gespeicherten Volumen  $V$  aus

$$V = f(h) \quad [1]$$

Im Falle des stationären Fließzustandes existiert auch eine eindeutige Beziehung zwischen dem Speichervolumen  $V$  und dem herrschenden Abfluß  $Q_A$ :

$$Q_A = f_1(V) \text{ bzw. } V = f_2(Q_A) \quad [2a, b]$$

woraus sich auch eine eindeutige Beziehung zwischen Abfluß und Wasserstand ersehen läßt.

Die Funktion  $V = f_2(Q_A)$  kann als "Beckeninhaltslinie" gedeutet werden, deren Ableitung positiv ist:

$$dV = dQ_A \cdot \tau \quad [3]$$

Diese Beziehung gemeinsam mit der Kontinuitätsgleichung,

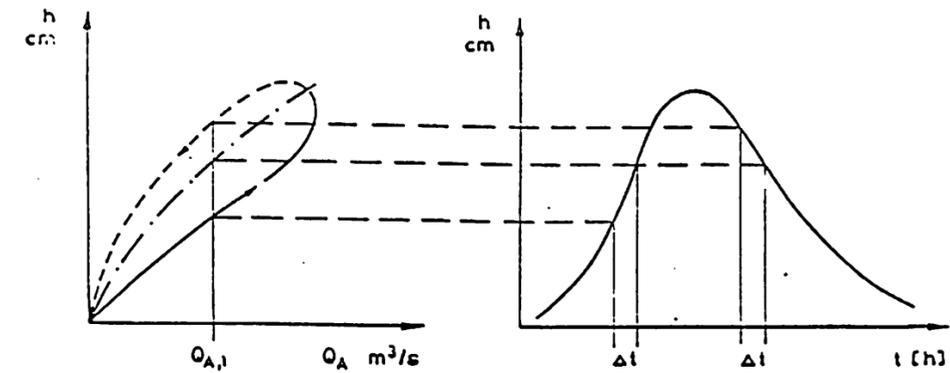
$$Q_z - Q_A = \frac{dV}{dt} \quad [4]$$

worin  $Q_z$  bzw.  $Q_A$  den Zu- bzw. Abfluß des betrachteten Gerinneabschnittes bedeuten, reicht aus, den Abfluß aus dem Gerinneabschnitt zu berechnen. Für den instationären Fall gilt bekanntlich die eindeutige Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluß nicht mehr, weil wegen des unterschiedlichen Spiegelgefälles am Wellenanstieg bzw. -abstieg zum selben Durchfluß zwei unterschiedliche Wasserstände auftreten, die ihrerseits vom Wasserstand des Stationärzustandes verschieden sind.

Durch ein Unterteilen der Gerinnestrecke läßt sich dieser eindeutige Zusammenhang für den einzelnen Gerinneabschnitt ("charakteristische Länge"  $L$ ) erreichen.

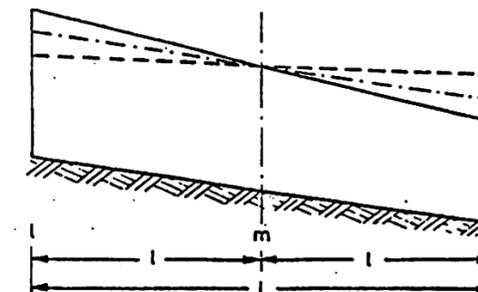
Wie die Abb. 1 und 2 zeigen, tritt im instationären Fall der zum gleichen Stationär-Abfluß gehörige Wasserstand beim Wellenanstieg wie beim Abstieg um dasselbe Zeitmaß  $\Delta t$  später auf, und es kann für den charakteristischen Abschnitt die eindeutige  $h-Q_A$ -Beziehung dadurch erreicht werden, daß dem Abfluß  $Q_A$  der Wasserstand  $h$  in der Mitte des Abschnittes zugeordnet wird.

Somit muß der gesamte Berechnungsabschnitt als eine Aufeinanderfolge von  $n$  charakteristischen Abschnitten (Speicherbecken) angesehen werden, für die die Gleichungen [3] und [4] gelten. Die Parameter  $n$  (Anzahl



- Anstieg des Hochwassers
- - - Rückgang des Hochwassers
- · - Stationäre Strömung

Abb. (1) Abflussschleife und Wasserstandsganglinie eines Hochwasserereignisses



- Anstieg des Hochwassers
- - - Rückgang des Hochwassers
- · - Stationäre Strömung

Abb. (2) Wasserspiegellagen in einem charakteristischen Abschnitt

der Speicherbecken) und  $k$  (Speicherkonstante des Einzelspeichers) sind allerdings noch unbekannt. Neben dem in (7) genannten Verfahren der Parameterbestimmung aus der Abflußkurve einer im Flußabschnitt liegenden Pegelstelle und der Gerinnegeometrie bietet sich noch das nachstehend angeführte Verfahren an.

Das Kernstück des Verfahrens, die Kaskade linearer Speicher, läßt sich nach Nash (6) behandeln, und die Parameter  $n$  und  $k$  können durch Rückrechnung aus beobachteten Wellen berechnet werden.

Grundbaustein des Nash-Konzeptes ist der sogenannte Instantaneous Unit Hydrograph (IUH), die "Antwort" der Speicherkaskade auf den Einheitszufluß  $q_z \cdot dt = 1$  während des Zeitintervalles  $dt \rightarrow 0$ .

$$u(\theta, t) = \frac{1}{k} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \cdot \frac{1}{(n-1)!} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad [5]$$

Aus dieser Impulsantwort läßt sich durch eine einfache Überlegung der Abfluß aus der Speicherkaskade zufolge eines Zuflusses endlicher Dauer  $t_0$  ermitteln. Der Einheitsimpuls wird unendlich oft hintereinander auftretend gedacht, und die jeweils entstehenden Impulsantworten werden überlagert. So entsteht eine Summenkurve  $S(t)$

$$S(t) = \int_0^t u(\theta, \tau) d\tau = \int_0^t \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{\tau}{k}\right)^{n-1} \cdot \frac{1}{(n-1)!} \cdot e^{-\frac{\tau}{k}} d\tau$$

Diese Summenkurve wird nur um die Dauer  $t_0$  verschoben und die Differenz zur ursprünglichen Summenkurve gebildet. Daraus ergibt sich bis auf einen Maßstabsfaktor die gesuchte Abflußganglinie zufolge des Zuflusses der Dauer  $t_0$ .

$$u(t_0, t) = [S(t) - S(t-t_0)] \cdot \frac{1}{t_0} \quad [6]$$

Diese Einheitsganglinie wird mit der Zuflußganglinie gefaltet und liefert dadurch die Abflußganglinie. Für die Parameter-Eichung ist es von gewisser Bedeutung, daß es auch für nicht ganzzahlige Werte von  $n$  möglich ist, die IUH-Ganglinie darzustellen, wenn man berücksichtigt, daß

$$(n-1)! = \Gamma(n)$$

wobei  $\Gamma(n)$  die Gammafunktion ist, die auch für nicht ganzzahlige Werte von  $n$  definiert ist. Diese Tatsache erlaubt es, die günstigste Parameterkombination ohne Rücksicht auf eine ganzzahlige Speicherzahl zu suchen.

Zur Bestimmung der optimalen Anpassung der berechneten an die beobachtete Welle muß eine Fehlergröße definiert werden, die für die optimale Parameterkombination ein Minimum wird.

Derartige Testgrößen werden in der Literatur mehrfach verwendet: Schultz (8) führt die hydrologische Deviation gemäß

$$DEV_1 = 200 \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i \text{ ber} - Q_i \text{ beob}| \cdot Q_i \text{ beob}}{n \cdot (\max Q_{\text{beob}})^2} \quad [7]$$

ein. Darin bedeutet  $Q_i \text{ beob}$  und  $Q_i \text{ ber}$  die beobachteten bzw. berechneten Abflüsse,  $n$  die Anzahl der beobachteten Abfluß-Ordinaten und  $\max Q_{\text{beob}}$  den beobachteten Scheitelwert. Für die durchgeführte Untersuchung wurden auch noch andere Fehlertestgrößen gemäß (3) verwendet, die aber im wesentlichen kein anderes Verhalten als die Deviation zeigten.

Bezüglich der Beurteilung dieser Fehlergröße gibt Schultz die nachstehend angeführten Zahlenwerte an:

Dev	Übereinstimmung
0 - 3	sehr gut
3 - 10	gut
10 - 18	brauchbar

Allerdings muß hierzu kritisch bemerkt werden, daß die angeführten Bewertungen keinesfalls als streng zu bezeichnen sind.

Für die Ermittlung der Modellparameter sind aus der Literatur Optimierungsverfahren bekannt, mit deren Hilfe automatisch die optimale Parameterkombination gefunden werden kann (9).

In der vorliegenden Arbeit wurden allerdings die Parameter durch graphische Auswertung von Isoplethen der Deviation gemäß Abb. 3 gewonnen.

Es sei noch erwähnt, daß die beschriebene Eichung des Modells im Grunde genommen keine deterministische Vorgangsweise ist, denn die Verwendung von mehreren beobachteten Wellen zur Parameterermittlung ist eine stochastische Arbeitsmethode.

#### Zwei-Stufen-Modell für den Bereich des Tullner Feldes

Um den eingangs erwähnten topographischen Verhältnissen im Tullner Feld Rechnung zu tragen, wurde zur Beschreibung des Ausuferungsvorganges ein zweiteiliges Modell, also zwei parallele Speicherkaskaden gewählt. Eine von ihnen soll den Abfluß im geschlossenen Profil simulieren, die andere den Vorland-Abfluß.

Derartige Zwei-Stufen-Modelle wurden bisher schon für die Beschreibung des Niederschlag-Abfluß-Vorganges (9) und des Hochwasserwellenablaufes (1, 2) mehrfach angewendet.

Die Aufteilung des Hochwasserdurchflusses in einen Flußschlauch- und einen Vorland-Anteil wurde bisher meist so getroffen, daß alle Durchflüsse, die größer als der Ausuferungsdurchfluß sind, mit den Parametern der Speicherkaskade für das Vorland gerechnet werden. Diese Aufteilung ist in Abb. 4a, b dargestellt.

Von dieser Praxis abgehend wird in der vorliegenden Arbeit eine andere Vorgangsweise vorgeschlagen:

Um eine bessere Anpassung an die natürlichen Gegebenheiten zu erreichen, wird das Flußschlauch-Profil nach oben verlängert gedacht, und der in diesem ideellen geschlossenen Querschnitt fließende Durchflußanteil wird mit den Parametern der Flußschlauch-Kaskade berechnet. Der restliche Durchfluß wird als Vorlandabfluß behandelt. Die Abb. 5a, b dient der Verdeutlichung dieser Art der Aufteilung.

Dieser Berechnungsgang scheint den natürlichen Verhältnissen in einem Fluß mit Vorländern eher gerecht zu werden als die Annahme eines konstanten Abflusses im Flußschlauch, was auch durch Modellversuche und Naturmessungen des Geschwindigkeitsprofils in einem Fluß mit zusammengesetztem Profil verifiziert ist (10, 11).

Abb. 6 zeigt die Verteilung der mittleren Geschwindigkeit für einen derartigen Flußquerschnitt.

Die praktische Durchführung der genannten Aufteilung wurde durch die Tatsache erleichtert, daß im Bereich des Tullner Feldes in mehreren Querprofilen aus Modellversuchen ermittelte Abflußkurven existieren. Im hohen Wasserstandsbereich weichen die Pegelschlüssel der Profile mit größeren Überflutungsräumen stark von dem des einigermaßen geschlossenen Profils bei Stein-Krems ab. Diese mit steigendem Wasserstand wachsenden Abweichungen wurden näherungsweise durch eine quadratische Parabel wiedergegeben (vgl. [8]).

$$Q = a_0 + a_1 \cdot Q_1 + a_2 \cdot Q_1^2 \quad [8]$$

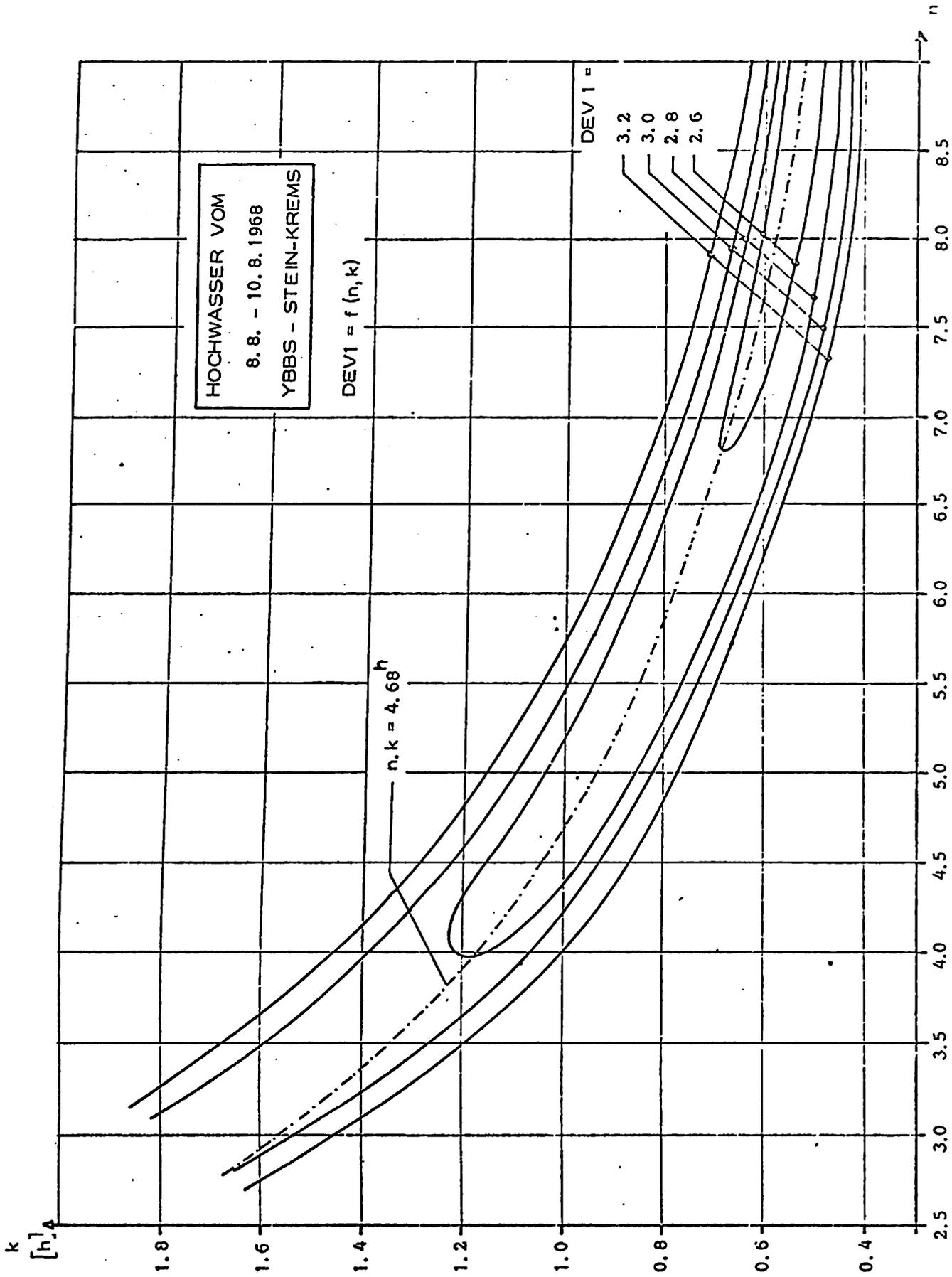


Abb. 3

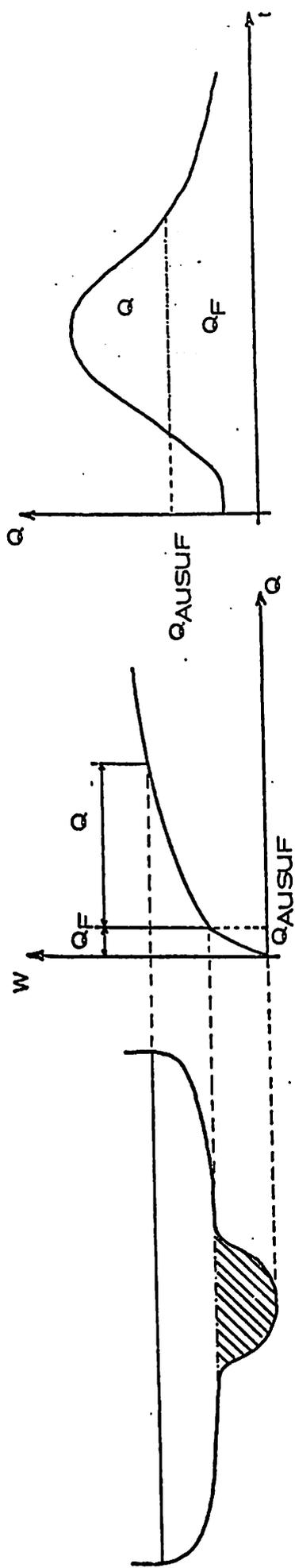


Abb. 4a

Abb. 4b

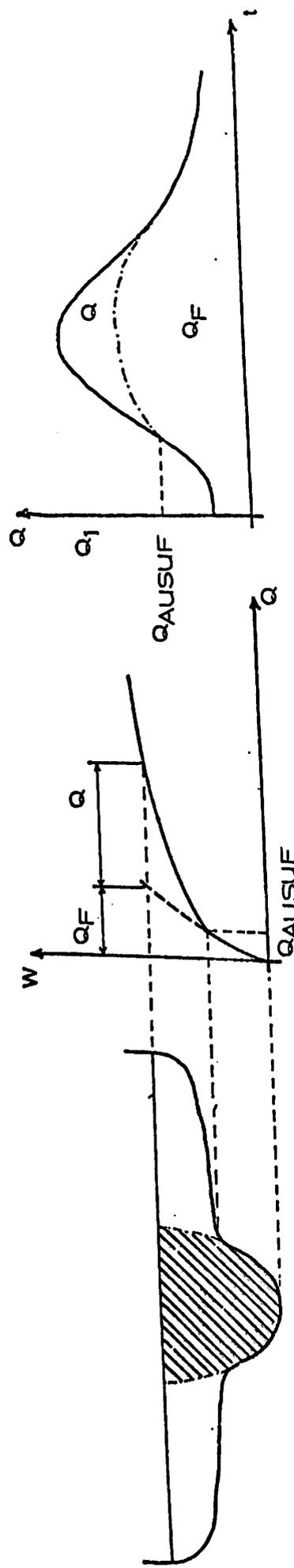


Abb. 5a

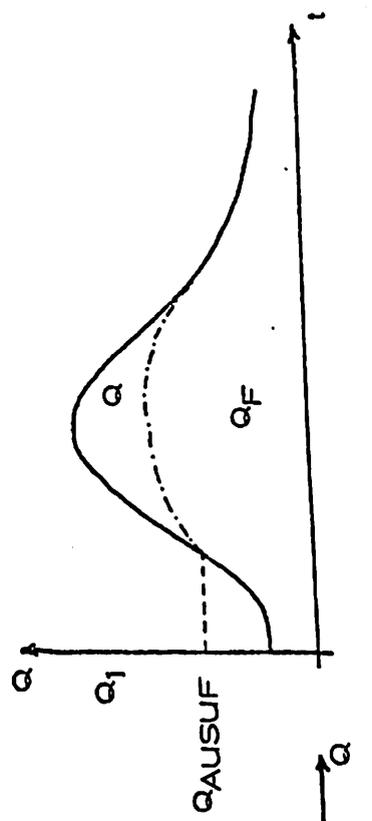


Abb. 5b

## Verteilung der mittleren Geschwindigkeit

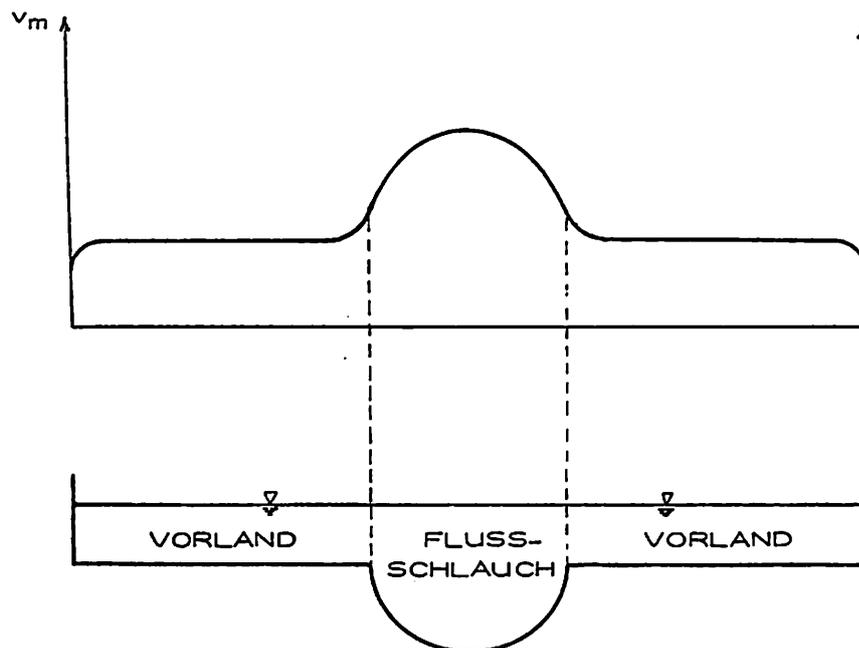


Abb. 6 Flußprofil mit Vorländern  
(idealisiert)

Hierin bedeutet - mit den Bezeichnungen der Abb. 5b -  $\Delta Q$  den Vorlandabfluß und  $Q_1$  den Abfluß im Gesamtprofil. Die Größen  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  sind dimensionsbehaftete Konstanten, die mit Hilfe des Prinzips der kleinsten Quadrate aus mehreren Wertepaaren ( $\Delta Q$ ,  $Q_1$ ) ermittelt wurden (12).

Die Durchrechnungen wurden mit einem in der Programmiersprache ALGOL 60 verfaßten Computerprogramm teils auf der IBM 7040 im Rechenzentrum der Technischen Hochschule Wien, teils auf der derzeitigen Anlage, einer CDC CYBER 74, durchgeführt.

Das Programm bietet die Möglichkeit der Modell-Eichung durch Variation der Systemparameter für Wellen mit oder ohne Ausuferung sowie die der Berechnung und Ausgabe der gesamten Ganglinie einschließlich diverser Fehlergrößen. Beispiele für die Programm-Ausdrucke sind in Tab. 1 und 2 zu sehen.

#### Durchgeführte Untersuchungen und Ergebnisse

Es wurden vierzehn Hochwässer der Donau auf den Strom-Abschnitten Ybbs-Stein und Stein-Wien untersucht. Hierbei zeigte es sich bei der Suche nach der optimalen Parameterkombination für das Kalinin-Miljukow-Verfahren, daß bei Wellen ohne Ausuferung das Produkt der beiden Parameter Speicherzahl mal Speicherkonstante ( $n.k$ ) ausschlaggebend für die Güte der Anpassung ist. Dieses Produkt ist deutbar als Laufzeit der Welle zwischen den Endpunkten des Berechnungsabschnittes.

Für die praktische Berechnung hat diese Erkenntnis zur Folge, daß aus Laufzeitkurven (5) oder Berechnungen von Wellen ohne Ausuferung die optimalen Parameter für den Flußschlauch-Anteil der ausufernden Hochwässer bestimmt werden können. Die Parameter-Eichung des Vorlandabflusses gestaltete sich insofern schwierig, als es nur wenige Wellen mit Ausuferung gibt, bei denen die Zubringer keinen Einfluß auf die Donauwelle ausüben.

Im Stromabschnitt Ybbs-Stein wurde die Rechnung nur für ein Modell mit e i n e r Speicherkaskade durchgeführt und auf die Berücksichtigung von Ausuferungen verzichtet. Trotzdem brachte diese Berechnungsart bei Wellen ohne Zubringereinfluß nach den in (8) genannten Kriterien sehr gute bis gute Ergebnisse. Hingegen konnten die Hochwasserereignisse mit größerem Zubringereinfluß durch das Verfahren nicht befriedigend beschrieben werden. Zur Prognosenerstellung eignet sich das Kalinin-Miljukow-Verfahren somit nur als Baustein in einem größeren Modell, das auch die Zubringereinflüsse berücksichtigt.

Diese Bemerkung gilt sinngemäß auch für den Berechnungsabschnitt von Stein nach Wien: Wellen ohne Zubringereinfluß konnten durch das Zwei-Stufen-Modell sehr gut bis gut wiedergegeben werden, während bei Wellen mit stärkerem Zustrom die Fehler oft bei mehr als fünfzehn Prozent lagen, wenn mit mittleren Parametern gerechnet wurde.

Für einige Wellen werden die Ergebnisse in Tab. 3 dargestellt.

Um einen Vergleich mit dem einfachsten stochastischen Verfahren, der Durchflußbezugslinie, zu erhalten, wurde ein Programm erstellt, das eine lineare Regression zwischen den Durchflußwerten der oberen und unteren Pegelstelle berechnet. Mit seiner Hilfe lassen sich bei Annahme einer konstanten Zeitverschiebung die Ganglinienwerte der unteren Pegelstelle aus denen der oberen berechnen.

Im Mittel über sämtliche Wellen ließen sich mit beiden Verfahren Ergebnisse ungefähr gleicher Qualität erzielen. Betrachtet man die Fehler von ihrer Entstehung her, so ist zu bemerken, daß Unstimmigkeiten der Pegelschlüssel beim Kalinin-Miljukow-Verfahren genauso vollständig als Fehler in die Berechnung eingehen, wie dies für den Einfluß der Zubringer gilt. Beim Regressionsverfahren werden diese Fehler selbsttätig ausgeglichen. Durch die genannten Ursachen, also Fehler im Pegelschlüssel und konstanten Zubringer-Einfluß, treten systematische Fehler auf, die sich durch ein Korrekturglied ausmerzen ließen. Eine weitere Verbesserung der Prognose ließe sich nur durch eine Erfassung der zeitlich veränderlichen Zuflüsse aus den Zwischeneinzugsgebieten erzielen.

Derzeit laufen am Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft der Technischen Hochschule Wien Untersuchungen in der Richtung einer Verbindung von deterministischen und stochastischen Modellen. Über diese Untersuchungen wird zu gegebener Zeit zu berichten sein.

#### L i t e r a t u r h i n w e i s e:

- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 1. Becker, A.<br>Blos, E.        | Flußgebietsmodell zur Hochwasservorhersage für das Bodegebiet. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 21. Jg., H. 4, S. 133-140, 1971.   |
| 2. Euler, G.                     | Zusammengesetzte Einzugsgebietsmodelle. 6. Fortbildungslehrgang für Hydrologie, Bad Herrenalb 1974.   |
| 3. Gutknecht, D.                 | Vergleichende Untersuchungen zur Berechnung von Hochwasserabflüssen aus kleinen Einzugsgebieten. Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer Band 11, Wien 1972.      |
| 4. Kresser, W.                   | Erfahrungen mit der Muskingum-Methode hinsichtlich ihrer Anwendung auf die österreichische Donau. VI. Konferenz für Hydrologische Vorhersagen, Kiew, 1971.              |
| 5. Kresser, W.<br>Gutknecht, D.  | 1. Bericht über die Untersuchungen zur Weiterentwicklung und Verbesserung der hydrologischen Vorhersagen an der Donau. Unveröffentlichter Forschungsbericht, Wien 1971. |
| 6. Nash, J.E.                    | The Form of the Instantaneous Unit Hydrograph. A.I.H.S. Publ. No. 45, 1958.   |
| 7. Rosemann, H.-J.<br>Vedral, J. | Das Kalinin-Miljukow-Verfahren zur Berechnung des Ablaufes von Hochwasserwellen. Schriftenreihe der Bayerischen Landesstelle für Gewässerkunde, Heft 6, München 1970.   |

8. Schultz, G.A. Bestimmung theoretischer Abflußganglinien durch elektronische Berechnung von Niederschlagskonzentration und Retention (HYREUN-Verfahren).  
Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Hochschule München, Bericht Nr. 11, 1968.
9. Wittenberg, H. Der Einfluß zunehmender Bebauung auf den Hochwasserabfluß.  
Institut Wasserbau III, Universität Karlsruhe, H. 4, 1974.
10. Zheleznyakov, G.V. Relative Deficit of Mean Velocity of Unstable River Flow, Kinematic Effect, in River Beds with Flood Plains.  
I.A.H.R., 11th International Congress, Leningrad 1965, Vol. III, Sect. 3.45.
11. Zheleznyakov, G.V. Interaction of Channel and Flood-Plain Streams.  
I.A.H.R., 14th International Congress, Proceedings Vol. 5, p. 302-1 - 302-4, 1971.
12. Zurmühl, R. Praktische Mathematik für Ingenieure und Physiker.  
Springer Verlag Berlin - Heidelberg - New York 1965.

GANGLINIENBERECHNUNG NACH KALININ-MILJUKOV. ANALYTISCHES VERFAHREN AUF BASIS DES I U M NACH N A S H

OBERE PEGELSTELLE.. STEIN-KR. DONAU 23 UNTERE PEGELSTELLE.. WIFN DONAU 23  
 =====  
 =====

VOLUMSFEHLER DER AUSGANGSDATEN = 1.875 PROZENT

DURCHFLUSS IM FLUSS-SCHLAUCH

N = 10.000 K = 0.720 T0 = 2.000

ERRECHNETE UH-ORDINATEN

DATUM	ZEIT	UZ	GAGFM	UFLSS	QVORL	QABER	BER-GEM	PROZ. V. GEM
8. 8. 1968	0.00	2482.000	2498.000	2482.000	0.000	2482.000	-16.000	-0.641
	2.00	2482.000	2497.000	2482.000	0.000	2482.000	-15.000	-0.601
	4.00	2482.000	2496.000	2482.000	0.000	2482.000	-14.000	-0.561
	6.00	2482.000	2495.000	2482.000	0.000	2482.000	-13.000	-0.521
	8.00	2578.000	2497.000	2482.030	0.000	2482.030	-14.970	-0.600
	10.00	2703.000	2518.000	2484.794	0.000	2484.794	-33.206	-1.319
	12.00	2828.000	2548.000	2503.976	0.000	2503.976	-44.024	-1.728
	14.00	3090.000	2594.000	2557.413	0.000	2557.413	-36.587	-1.410
	16.00	3601.000	2706.000	2650.595	0.000	2650.595	-55.405	-2.048
	18.00	3952.000	2831.000	2795.448	0.000	2795.448	-35.552	-1.256
	20.00	4178.000	3042.000	3027.766	0.000	3027.766	-14.234	-0.468
	22.00	4281.000	3376.000	3348.357	0.000	3348.357	-27.643	-0.819
9. 8. 1968	0.00	4338.000	3722.000	3686.768	0.000	3686.768	-35.232	-0.947
	2.00	4304.000	3978.000	3965.246	0.000	3965.246	-12.754	-0.321
	4.00	4212.000	4163.000	4152.543	0.000	4152.543	-10.458	-0.251
	6.00	4178.000	4270.000	4251.772	0.000	4251.772	-18.228	-0.427
	8.00	4087.000	4329.000	4275.788	0.000	4275.788	-53.212	-1.229
	10.00	3916.000	4299.000	4248.545	0.000	4248.545	-50.455	-1.174
	12.00	3741.000	4256.000	4193.113	0.000	4193.113	-62.887	-1.478
	14.00	3622.000	4192.000	4108.854	0.000	4108.854	-83.146	-1.983
	16.00	3506.000	4062.000	3988.978	0.000	3988.978	-73.022	-1.798
	18.00	3341.000	3910.000	3847.788	0.000	3847.788	-62.213	-1.591
	20.00	3280.000	3760.000	3707.273	0.000	3707.273	-52.727	-1.402
	22.00	3230.000	3639.000	3572.823	0.000	3572.823	-66.177	-1.819
10. 8. 1968	0.00	3220.000	3509.000	3448.255	0.000	3448.255	-60.745	-1.731
	2.00	3220.000	3396.000	3348.048	0.000	3348.048	-47.952	-1.412
	4.00	3220.000	3331.000	3280.785	0.000	3280.785	-50.216	-1.508

MITTLERER ABSOLUTFEHLER.. 39.224 MITTLERER QUADM. FEHLER.. 45.452

DEVIATION BEZOGEN AUF QMAX.. DEVI = 1.482

DEVIATION BEZOGEN AUF Q0.. DEVI2 = 1.905

BEZOGENE QUADRATISCHE ABWEICHUNG.. F = 0.0647

OBERE PEGELSTELLE.. STEIN-KR. DONAU 23 UNTERE PEGELSTELLE.. WIEN DONAU 23

VOLUMSFFHLER DER AUSGANGSDATEN = 1.675 PROZENT  
 GAUSUF = 5190.000

N	K	DEV1	DEV2	F	DIFVOL	MAF	MGF	ZEIT
2.00	3.00	3.894	5.011	0.1834	-0.764	100.655	128.902	0.02
2.00	4.00	3.352	4.310	0.1631	-1.791	79.757	114.677	0.02
2.00	5.00	5.386	6.925	0.2673	-2.953	128.658	187.939	0.02
3.00	2.00	3.425	4.404	0.1608	-0.709	88.625	113.023	0.02
3.00	3.00	3.861	4.964	0.1911	-2.207	94.347	134.366	0.02
3.00	4.00	8.250	10.607	0.3998	-3.999	203.840	281.076	0.02
4.00	1.00	6.930	8.909	0.3411	0.168	182.717	239.794	0.02
4.00	2.00	2.294	2.950	0.1134	-1.619	56.206	79.701	0.02
4.00	3.00	8.464	10.882	0.4140	-3.859	211.617	291.058	0.03
5.00	1.00	5.040	6.479	0.2415	-0.247	131.450	169.775	0.03
5.00	2.00	5.343	6.864	0.2663	-2.608	135.838	187.197	0.03
5.00	3.00	12.955	16.656	0.6280	-5.742	321.479	441.491	0.03
6.00	0.50	8.862	11.393	0.4435	0.582	235.402	311.738	0.03
6.00	1.00	3.168	4.073	0.1459	-0.666	81.639	102.597	0.03
6.00	1.50	3.561	4.578	0.1827	-2.049	91.916	128.428	0.03
6.00	2.00	8.795	11.307	0.4330	-3.696	222.320	304.788	0.03
6.00	3.00	16.899	21.726	0.8134	-7.841	414.945	571.786	0.03
7.00	0.50	7.896	10.151	0.3931	0.375	208.612	276.342	0.03
7.00	1.00	1.594	2.044	0.0724	-1.094	40.816	50.882	0.03
7.00	1.50	6.223	8.000	0.3153	-2.798	159.738	221.629	0.03
7.00	2.00	12.115	15.576	0.5910	-4.901	303.483	415.434	0.03
7.00	2.50	16.748	21.532	0.8060	-7.395	412.608	567.018	0.03
8.00	0.50	6.975	4.968	0.3432	0.172	183.170	241.278	0.03
8.00	1.00	1.962	2.522	0.0991	-1.536	51.895	69.692	0.03
8.00	1.50	8.916	11.463	0.4459	-3.608	226.756	313.471	0.03
8.00	2.00	15.13	19.452	0.7342	-6.226	375.705	516.100	0.03
9.00	0.50	6.051	7.780	0.2932	-0.031	157.970	206.128	0.03
9.00	1.00	3.462	4.451	0.1851	-1.995	91.328	130.099	0.03
9.00	1.50	11.560	14.662	0.5701	-4.485	291.318	400.790	0.03
9.00	2.00	17.900	23.013	0.8616	-7.666	440.695	605.705	0.03
10.00	0.50	5.102	6.560	0.2432	-0.235	132.270	170.948	0.03
10.00	1.00	5.296	6.809	0.2779	-2.476	138.135	195.376	0.03
10.00	1.50	14.073	18.092	0.6862	-5.435	351.697	482.373	0.04
10.00	0.60	3.187	4.097	0.1451	-0.651	81.674	101.994	0.04
10.00	1.65	2.283	2.935	0.1012	-0.862	58.598	71.119	0.04
10.00	0.70	1.490	1.915	0.0696	-1.077	38.969	48.909	0.04
10.00	0.75	1.631	2.097	0.0690	-1.296	43.650	48.477	0.04
10.00	0.80	1.905	2.444	0.0991	-1.520	51.403	69.681	0.04
10.00	0.85	2.544	3.271	0.1409	-1.749	68.167	99.050	0.04
10.00	0.90	3.438	4.420	0.1860	-1.985	91.131	130.777	0.04
10.00	0.95	4.351	5.593	0.2320	-2.226	114.365	163.102	0.04
10.00	1.00	5.296	6.809	0.2779	-2.476	138.135	195.376	0.04
10.00	1.10	7.190	9.244	0.3679	-2.998	185.204	258.660	0.04
10.00	1.20	9.027	11.605	0.4544	-3.553	230.300	319.429	0.04
10.00	1.30	10.766	13.841	0.5365	-4.144	272.603	377.147	0.04

Tab. 2

# KALININ-MILJUKÓW-VERFAHREN

Anwendung auf den Donauabschnitt Stein, Wien

Hochwasser vom	DEV <sub>1</sub>	MAF m <sup>3</sup> /s	MQF m <sup>3</sup> /s	max F  m <sup>3</sup> /s	% v. Q <sub>beob</sub>	Anmerkung
-	-	-	-	-	-	-
2	6. 410	241.5	283.7	548.7	10.1	
8. 5.1965	6. 447	241.9	285.7	557.6	10.4	Ausfuhrung, Zubringer
8	2. 060	75.3	113.6	407.0	10.6	
27. 6.1966	2. 134	77.9	118.5	407.0	10.6	Ausfuhrung
9	2. 187	59.3	72.7	123.1	2.5	
6. 7.1966	2. 194	59.7	74.4	129.7	2.7	-
10	4. 222	182.9	238.5	531.5	8.4	
23. 7.1966	4. 305	186.3	242.8	538.1	8.5	Ausfuhrung, Zubringer
11	2. 203	64.3	84.6	207.2	4.5	
9. 8.1966	2. 178	63.3	91.6	215.4	4.9	-
23	1. 482	39.2	45.4	83.1	2.0	
8. 8.1968	1. 490	39.0	48.9	92.2	2.2	-
24	1. 841	55.8	88.8	255.6	5.2	
4. 10.1968	1. 963	60.3	87.4	237.1	4.8	Ausfuhrung

Die oberen Zahlen gelten für die Rechnung mit der optimalen Parameterkombination, die unteren für mittlere Parameterwerte.

$$\text{Definitionen: } F = Q_{\text{ber}} - Q_{\text{beob}} \quad \text{MAF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i| \quad \text{MQF} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i^2$$

DEV 1 ..... Formel (7)

Tab. 3

111

112

113

114

115

116

117

118

119

120

121

122

123

124

125

126

127

128

129

130

131

132

133

134

135

136

137

138

139

140

141

142

143

144

145

146

147

148

149

150

151

152

153

154

155

156

157

158

159

160

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

172

173

174

175

176

177

178

179

180

181

182

183

184

185

186

187

188

189

190

191

192

193

194

195

196

197

198

199

200

НЕПРЕРЫВНЫЕ ПРОГНОЗЫ РАСХОДОВ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ  
НА ГОРНЫХ РЕКАХ, ОСНОВАННЫЕ НА УЧЕТЕ ПРОЦЕССОВ,  
ПРОИСХОДЯЩИХ В РУСЛОВОЙ СЕТИ

М.Н.Соседко

KONTINUIERLICHE VORHERSAGEN VON REGENHOCHWASSER-  
ABFLOSSEN AM DNJESTR UND SEINEN GEBIRGSZUFLOSSEN

M.N.Sosedko

Резюме

Излагается схема непрерывных краткосрочных прогнозов хода дождевых паводков на Днестре и его горных притоках. В методике прогноза учитывается начальное распределение водных масс в речной системе, неравномерность поступления притока по длине реки и процесс трансформации паводочных волн.

Прогнозы составляются в любой момент времени в виде перекрывающихся отрезков гидрографа с шагом в 4 - 8 часов.

Прогнозная схема реализована в программе счета на ЭВМ, которая включает также модель аналитического представления функций  $Q(H)$ .

Zusammenfassung

Es wird das Konzept der kontinuierlichen kurzfristigen Vorhersage des Ablaufes von Regenhochwässern am Dnjestr und seinen Gebirgszubringern vorgeführt. In der Vorhersagemethode sind die Abflüsse vor Beginn der Hochwasserwelle im Flußsystem, der Einfluß der Zwischeneinzugsgebiete und der Einfluß der Wellenverformung berücksichtigt.

Die Vorhersagen werden zu jedem Zeitpunkt als überdeckende Hochwasserganglinienabschnitte mit der Zeitspanne von 4 - 8 Stunden erstellt.

Dieses Vorhersagekonzept ist Grundlage eines Computerprogrammes, das auch ein Modell der analytischen Darstellung von Abflußkurven - Funktionen  $Q(H)$  einschließt.

Разработка рекомендаций по предвычислению дождевого стока на горных реках Карпат с их частыми ливневыми паводками, нередко катастрофического характера, имеет первостепенное значение как в целях осуществления защитных мероприятий, так и для повышения эффективности эксплуатации гидроэнергетических и др. водохозяйственных сооружений.

Наибольший эффект в данном случае может представлять информация о предполагаемой гидрологической обстановке, в которой бы освещался ход дождевых паводков непрерывно в течение всего периода их развития на максимально возможном количестве водных объектов. Реализация подобной прогнозной схемы рассмотрена на примере рек бассейна Днестра.

1. Особенности формирования дождевых паводков в бассейне Днестра

Основной зоной формирования дождевых паводков в бассейне Днестра (рис.1) является правобережная его часть, расположенная на северо-восточных склонах Карпат. В ее пределах наблюдается наиболее интенсивный сток: модули максимальных расходов воды 1%-ной вероятности превышения на реках с площадями водосборов 80-300 км<sup>2</sup> достигают 3 000 - 3 400 л/с км<sup>2</sup>. С удалением от горных массивов максимальные модули уменьшаются до 100-300 л/с км<sup>2</sup> (левобережье Днестра).

По условиям формирования дождевых паводков территория северо-восточных склонов Карпат может быть отнесена к одному региону (2, 12 и др.). Однако, особенности в орографии мест-

ности, различия в положении зоны интенсивного стока, форме водосборов и величине русловой емкости правых притоков Днестра существенно отражаются на динамичности сброса дождевой воды в русловую сеть и перемещении паводочных волн по водотокам.

Своеобразно расположена в бассейне зона повышенного стока; она простирается почти параллельно главной реке на расстоянии 70-90 км от нее. Здесь получают питание крупные водообильные притоки - Стрый ( $F=3\ 060\text{ км}^2$ ), Свича ( $F=1\ 490\text{ км}^2$ ), Ломница ( $F=1\ 530\text{ км}^2$ ) и Быстрица ( $F=2\ 520\text{ км}^2$ ). Впадая последовательно в Днестр, эти притоки играют основную роль в формировании паводочных волн на самом Днестре, поскольку их сток соизмерим с транзитными расходами воды главной реки. На разницу во времени добегания воды по главной реке, равную для горной части бассейна  $\approx 60$  ч, накладывается разновременность выпадения эффективных осадков ( $\approx 10-15$  ч). За счет взаимодействия этих двух факторов сдвиг одноименных фаз паводочных волн, поступающих с частных площадей бассейна к створам ниже Галича (№ 5), может колебаться в пределах от 50 до 75 ч.

Все дождевые паводки характеризуются интенсивным ходом стока. Даже на главной реке в створах, замыкающих площади в 15-43 тыс.км<sup>2</sup>, изменения расходов воды достигают в период подъема 2 000 - 2 800 м<sup>3</sup>/с за 12ч и 3 200 - 4 800 м<sup>3</sup>/с за 24ч при предпаводочной их величине 100 - 200 м<sup>3</sup>/с.

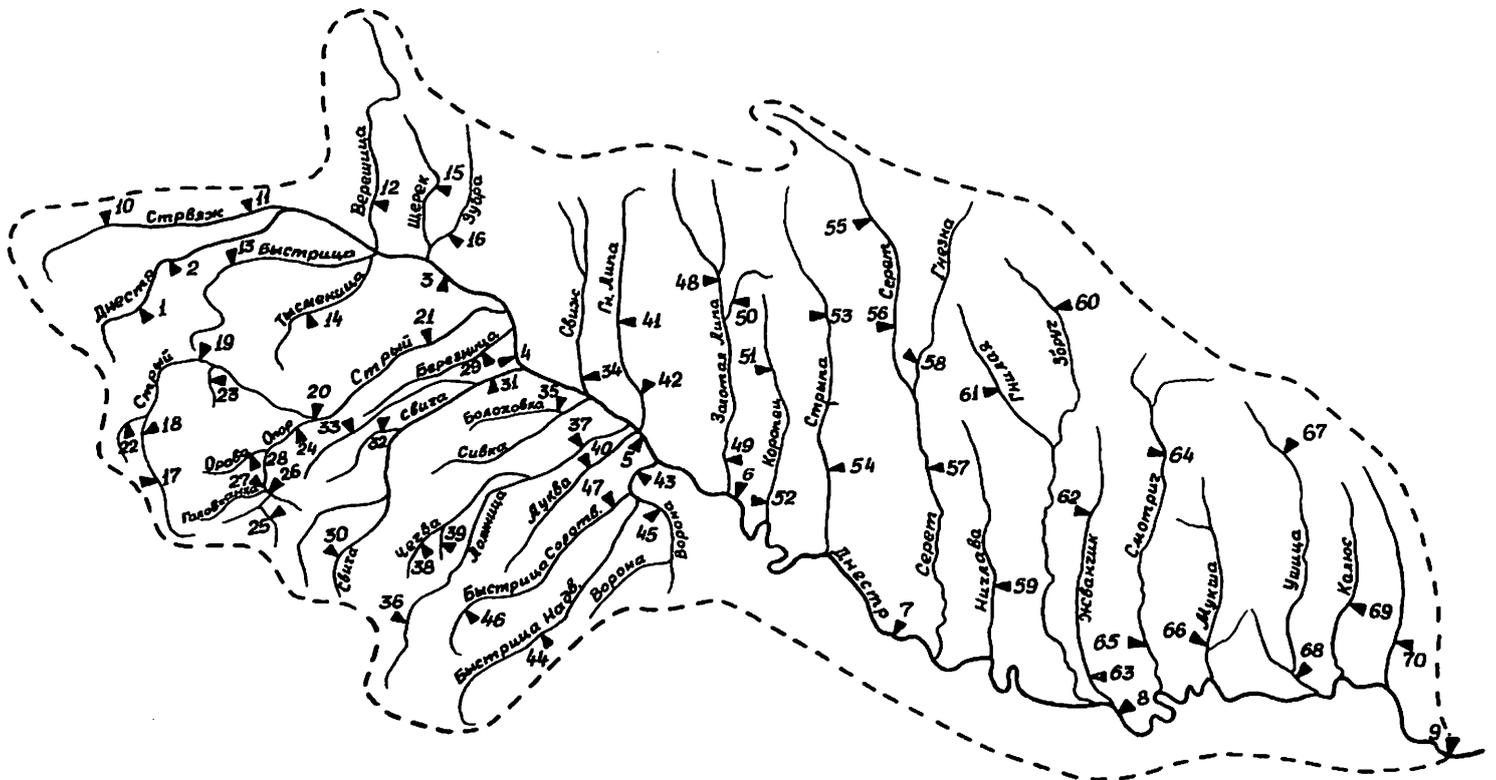


Рис. I. Схема бассейна верхнего и среднего Днестра. Числа у пунктов - номера постов по гидрографической схеме.

## 2. Исходные предпосылки

Предлагаемая схема предвычисления хода дождевого стока основывается на рассмотрении процессов, происходящих в русловой сети бассейна. Для оценки притока с отдельных частных площадей используются сведения о стоке малых рек. Такой способ расчета притока имеет, как известно, более высокую точность, чем по данным об осадках, и при этом заблаговременность предсказания практически не снижается.

Анализ пространственного распределения притока в бассейне показал необходимость учета его характера при построении прогнозной схемы как для Днестра, так и для его притоков.

Установлено также, что в условиях интенсивного развития процессов стокообразования в рассматриваемом бассейне наиболее целесообразно основывать прогнозную методику на использовании срочных наблюдений, а не средних суточных величин. В противном случае не представляется возможным описать гидрограф стока с такой точностью, которая необходима для практики, и выпуск прогнозов ставится в зависимость от наличия предшествующей информации.

Для разработки методики нами привлечены сведения о ходе стока в период дождевых паводков, полученные на основании многосрочных наблюдений над уровнями воды (через 2-4 ч).

## 3. Сущность метода

В общей схеме прогноза дождевых паводков в бассейне Днестра учитывается состояние водности в начальный момент, характер распределения притока по территории и процесс перемещения паводочных волн.

С точки зрения учета пространственной неравномерности водоотдачи наиболее полную картину дает рассмотрение водосбора в виде динамической системы с несколькими входами и одним выходом. На практике учет неравномерности хода процесса формирования стока во времени и по территории заключается в использовании частных функций влияния (кривых добегания), с помощью которых приток с каждой выделенной площади бассейна трансформируется к замыкающему створу (7, 10, 11). При этом изменение условий перемещения водных масс в русловой сети при различном ее наполнении учитывается переменными функциями влияния.

Недостаток детальной информации об осадках или стоке малых рек в бассейне Днестра, имея в виду получение графиков притока для каждой межизохронной площади водосбора, не дает возможности реализовать преимущества, предоставляемые точным описанием процесса формирования гидрографа стока. Поэтому нами введен ряд упрощений при учете определяющих факторов и построении прогнозных зависимостей.

3.1. Притоки Днестра. Характер пространственной неравномерности поступления воды в речную сеть на водосборах правых притоков Днестра выражен нами через отношение модулей стока нижней  $M_n$  и верхней  $M_v$  их частей

$$\alpha_t = \frac{M_n(t)}{M_v(t)} \quad [1]$$

Подобный показатель использовался в работе (3) при построении элементарных гидрографов.

В качестве характеристики регулирующего эффекта русловой емкости и начальной водности речной системы принята величина расхода воды  $Q_i(t)$  в  $i$ -том замыкающем створе в момент составления прогноза  $t$ .

Итак, схема для предвычисления расходов воды в замыкающем створе водосбора с заблаговре-

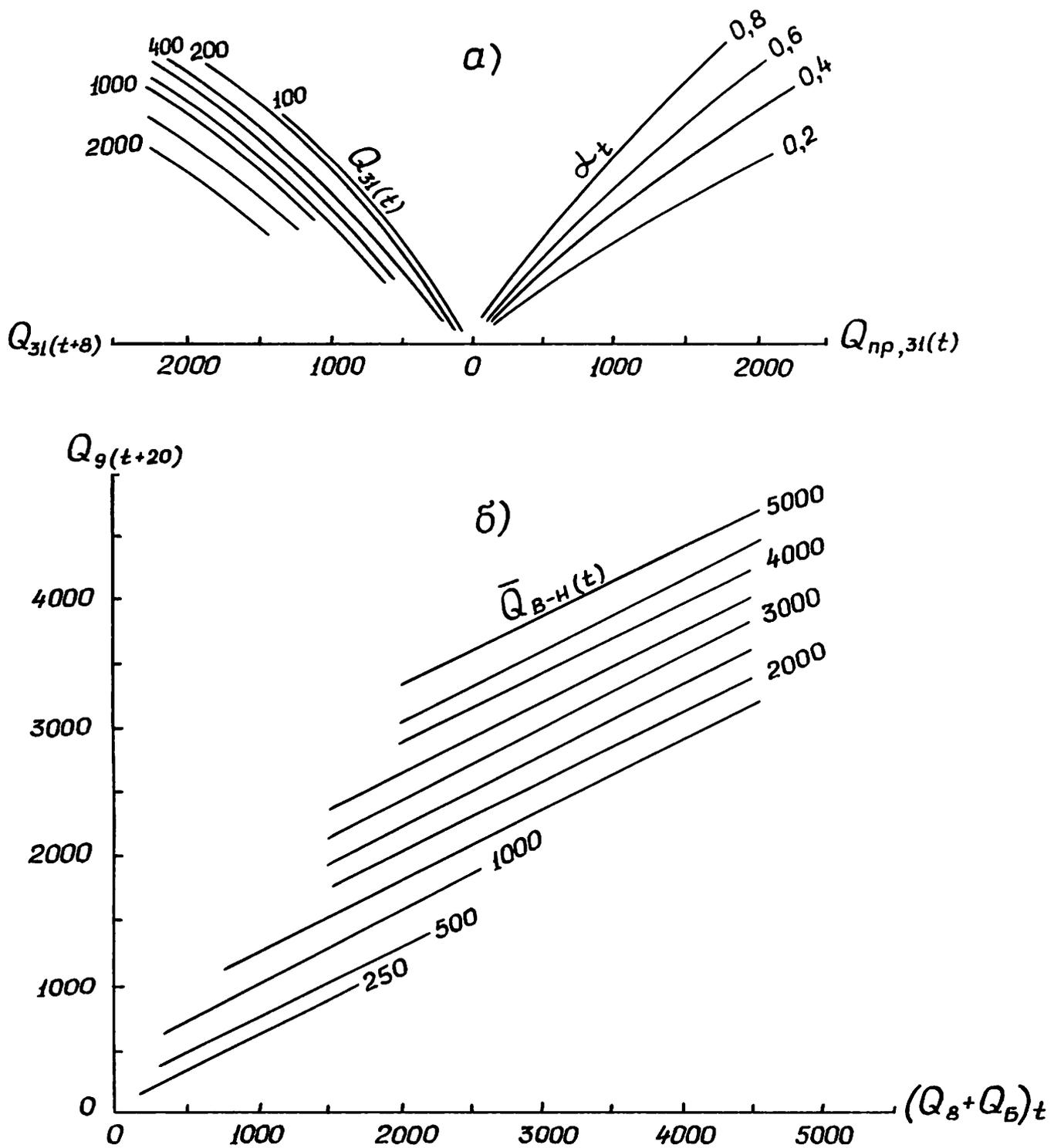


Рис. 2. Прогнозные зависимости для р. Свичи у с. Заречное (а) и для участка р. Днестра между створами 8 и 9 (б).

менностью  $\Delta t$  может быть записана в следующем виде:

$$Q_i(t+\Delta t) = f\left(Q_{пр}, i(t), \alpha_t, Q_i(t)\right) \quad [2]$$

где  $Q_{пр}, i(t)$  - величина суммарного притока воды в момент  $t$ , вычисленная через средний арифметический модуль (10). Зависимость (2) решена для 9 створов на притоках Днестра (№ 19, 20, 21, 24, 31, 37, 43, 45, 47) методом множественной графической корреляции (напр., рис.2а).

Доля вклада отдельных аргументов в общую тесноту связи (2) колеблется в пределах:

$$Q_{пр}, i(t) - 40-80\%, \alpha_t - 20-33\%, Q_i(t) - 0-18\%.$$

3.2. Река Днестр. При решении задачи прогноза гидрографов стока р.Днестра в створах № 5, 6, 7, 8 и 9 приняты во внимание принципы построения расчетных схем, рекомендованные авторами работ (5-7, 9-11). Однако, реализация этих предложений в части способа трансформации паводочных волн выполнена без применения функций влияния, а с помощью установленных для выделенных участков Днестра зависимостей расхода воды в нижнем створе  $Q_H(t + \Delta t)$  от величины притока  $Q_B(t) + Q_Б(t)$  и степени руслового наполнения  $\Delta W_t$ , выраженного через расходы воды в граничных створах, то есть

$$Q_H(t+\Delta t) = f\left(Q_B(t) + Q_Б(t), \Delta W_t\right) \quad [3]$$

$$\Delta W_t = f'\left(\frac{Q_B(t) + Q_H(t)}{2}\right) = f'\left(\bar{Q}_{B-H}(t)\right) \quad [4]$$

$$Q_H(t+\Delta t) = f\left(Q_B(t) + Q_Б(t), \bar{Q}_{B-H}(t)\right) \quad [5]$$

где  $Q_B(t)$  - расход воды в верхнем створе участка,  $Q_Б(t)$  - боковой приток на участке.

В случае, если функция [5] линейная, после определения ее параметров аналитическое выражение зависимости [5] принимает вид

$$Q_H(t+\Delta t) = K_1 Q_B(t) + K_2 Q_H(t) + K_3 Q_Б(t) \quad [6]$$

По своей структуре уравнение [6] является частным случаем расчета трансформации по методу Маскингам (8) и идентично формуле аналитического способа расчета неустановившегося движения воды Г.П.Калинина и П.И.Милюкова (4, 5, 9).

Нелинейность процесса перемещения водных масс учтена в самих зависимостях [5], представленных в виде графических связей (рис.2б) и уравнений типа [6], полученных для отдельных диапазонов средних расходов воды на участке  $\bar{Q}_{B-H}$ .

Расчет движения паводочной волны по р. Днестр выполняется путем последовательных операций на каждом выделенном участке, начиная с верхнего.

#### 4. Особенности построения алгоритма

Схемы прогнозирования хода дождевого стока на Днестре и его притоках реализованы в программе счета на ЭВМ, составленной на языке АЛГОЛ-60.

Так как регулярная оперативная информация поступает с наблюдательной сети в виде сведений об уровнях воды, а в прогнозных схемах используются стоковые данные, нами разработана мо-

дель аналитического описания кривых расходов воды  $Q(H)$  и представления параметров этих функций в памяти ЭВМ в форме, удобной для машинного счета.

Параметры функций  $Q(H)$  определяются на ЭВМ способом кусочно-полиномиальной аппроксимации с фиксированной степенью полинома. В основу решения положен принцип одинаковой относительной точности ( $\pm 2-4\%$ ). Параметры  $Q(H)$  всех 70 постов бассейна Днестра заданы в виде прямоугольной матрицы  $A(i,j)$  размером  $70 \times 12$ , в которой каждая функция  $Q(H)$ , как состоящая в общем случае во всей области ее определения из трех парабол, характеризуется 11-ю параметрами - девять коэффициентов и два значения уровня в точках сопряжения отрезков.

Таблица 1

Макет представления параметров зависимости  $Q(H)$  постов бассейна Днестра в виде матрицы

№ ПОСТОВ ПО ГИДРО- ГРАФИ- ЧЕСКОЙ СХЕМЕ	Наименование параметра											
	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$H_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$	$H_2$	$a_3$	$b_3$	$c_3$	-
	Координаты параметра в матрице $A$											
	$i, 1$	$i, 2$	$i, 3$	$i, 4$	$i, 5$	$i, 6$	$i, 7$	$i, 8$	$i, 9$	$i, 10$	$i, 11$	$i, 12$
I	0,012280	-3,731	284,01	210	0,004946	-1,054	45,27	390	0,0	4,43	-1328	0,0
...												
10	0,001178	0,259	-28,77	250	0,001453	0,110	-14,51	2000	0,0	0,0	0,0	0,0
...												
70	0,001034	-0,167	7,30	160	0,000840	-0,111	3,60	250	0,000021	0,26	-38,5	0,0

Примечание: При отсутствии сведений о параметрах функций  $Q(H)$  в соответствующие ячейки заносится нули. Условное число 2 000 превышающее максимально возможный уровень воды в колонках  $H_2$  или  $H_3$  показывает, что функция  $Q(H)$  состоит лишь из одного или двух отрезков.

Алгоритм описания вычислительного процесса для притоков Днестра основан на использовании прогнозных зависимостей трех переменных [2], аналитическое выражение которых затруднено. Поэтому они представлены для всех створов в виде общей таблицы с двумя входами - матрицы  $B(i,j)$  размером  $69 \times 12$ .

Расчеты перемещения паводочных волн по Днестру оказалось целесообразным выполнять с помощью аналитических выражений зависимостей [5].

Комплексная программа состоит из четырех основных блоков, описание которых дано на упрощенной блок-схеме, иллюстрирующей лишь связи между основными блоками (рис.3). В программе предусмотрено три варианта решения задачи, в том числе при условии сохранения на период  $\Delta t$  величин притока воды на прежнем уровне.

Для решения одной задачи требуется 100 -110 сек. машинного времени.

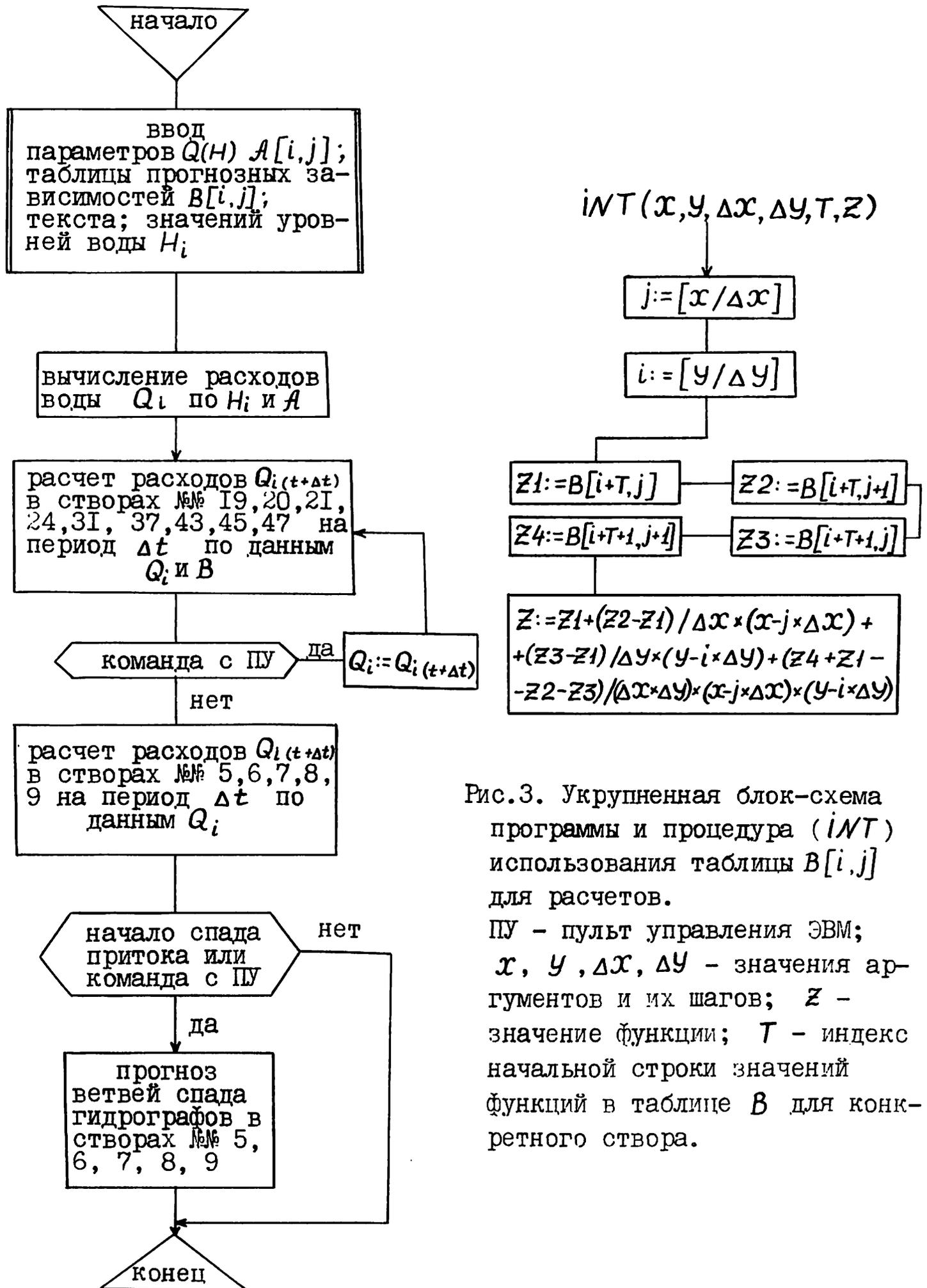


Рис. 3. Укрупненная блок-схема программы и процедура ( $INT$ ) использования таблицы  $B[i, j]$  для расчетов. ПУ - пульт управления ЭВМ;  $x, y, \Delta x, \Delta y$  - значения аргументов и их шагов;  $Z$  - значение функции;  $T$  - индекс начальной строки значений функций в таблице  $B$  для конкретного створа.

### 5. Заключение

Рассмотренная схема предвычисления дождевых паводков обеспечивает необходимую оперативность выпуска прогнозов по 14 пунктам с заблаговременностью 20 - 72 ч на Днестре и 4-12 ч на его притоках и достаточную точность описания внутрисуточного хода стока. Составление прогнозов возможно в любой момент времени и не требует привлечения данных за предшествующий период.

Гидрографы в створах на Днестре рассчитываются в виде перекрывающихся отрезков с шагом в 4 - 8 ч, что позволяет уточнять прогнозные величины, выданные в предыдущие сроки.

Реализованная в комплексной программе счета на ЭВМ прогнозная схема представляет собой региональную модель формирования дождевых паводков в бассейне.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Аполдов Б.А.  
Калинин Г.П.  
Комаров В.Д.. Курс гидрологических прогнозов. Л., Гидрометеиздат, 1974.
2. Бефани Н.Ф. Территориально-общие зависимости для прогнозирования паводочного стока рек Восточных Карпат. - Сборник докладов у 1 Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Киев, изд. "Урожай", 1972.
3. Вирт П.  
Жуффа И. Построение элементарного гидрографа методом гидрологической аналогии. Сб. "Международный симпозиум по паводкам и их расчетам", т.1. Л., Гидрометеиздат, 1969.
4. Грушевский М.С. Волны попусков и паводков в реках. Л., Гидрометеиздат, 1969.
5. Калинин Г.П.  
Милюков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс. Труды ЦИП, 1958, вып.66.
6. Кучмент Л.С.  
Нечаева Н.С. Расчеты гидрографов стока на крупных речных системах. Труды ГМЦ, 1967, вып.2.
7. Левин А.Г. Прогнозы паводков по данным о расходах воды малых рек. Труды ГМЦ, 1967, вып.2.
8. Линслей Р.К.  
Колер М.А.  
Паулюс Д.Х. Практическая гидрология. Л., Гидрометеиздат, 1962.
9. Милюков П.И. Развитие методов краткосрочных прогнозов расходов и уровней рек на основе теории неустановившегося движения воды. - Труды ГМЦ, 1973, вып. 113.
10. Нежиховский Р.А. Русловая сеть бассейна и процесс формирования стока воды. Л., Гидрометеиздат, 1971.
11. Сапожников В.И. Учет неравномерности стока в речных бассейнах при прогнозе расходов и уровней воды. - Материалы IY Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Братислава, 1967.
12. Соседко М.Н. Зависимость характеристик максимальных расходов воды дождевых паводков в бассейне Днестра от ландшафтных условий. Труды УкрНИГМИ, 1973, вып. 123.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛОВОЙ СИМУЛЯЦИИ  
В ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПОВОДОЙ НА ДУНАЕ

Хынку С., Дума Д., Дан П.

DIE ANWENDUNG DER NUMERISCHEN SIMULATION BEI  
DER VORHERSAGE VON HOCHWÄSSERN AN DER DONAU

Hincu S., Duma D., Dan P.

Резюме

В статье приводятся результаты симуляции паводков на Дунае ниже Железных Ворот с помощью оптимизированной расчетной модели паводка 1970 года. Даются уточнения относительно обвалованного режима паводкой и ставится на рассмотрение применение расчетной модели и в гидрологическом прогнозировании формирования и прохождения паводков на данном участке Дуная.

Zusammenfassung

In der Arbeit werden Ergebnisse über die Simulation von Hochwässern an der Donau unterhalb des Eisernen Tores mit Hilfe des optimisierten mathematischen Modells für das Hochwasser 1970 angeführt. Präzisiert werden die hydraulischen Parameter für das Hochwasserregime in einer eingedeichten Flußstrecke, dargestellt wird die Anwendung des mathematischen Modells für die hydrologische Vorhersage der Entstehung und des Ablaufs von Hochwässern im gegebenen Donauabschnitt.

Числовая симуляция\*) паводков Дуная на румынском участке, и особенно самого большого паводка, паводок 1970 года, связана с решением конкретных практических задач, как например, проверка гидрологических и гидравлических расчетов, сделанных прежде для установления размеров дамб, прогноза паводкой, установления размеров комплексных работ, гидротехнических и судоходных на стадии проектирования и т.д.

Числовая симуляция паводков на Дунае сопутствовалась использованием на высоком уровне имеющихся гидрометрических (расходы, уровни) и топографических (недавние съемки профилей) основных данных, а также использование надлежащей расчетной модели, основанной на решении с помощью конечных разностей и современных ЭВМ уравнений неустановившегося, медленно-изменяющегося движения воды в открытых руслах:

$$\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{1}{g\omega} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{g\omega^2} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{Q^2}{g\omega^3} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{Q^2}{K^2} = 0 \quad [1]$$

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad [2]$$

при начальных условиях:  $t = 0; z = z(x), Q = Q(x)$  [3]

при предельных условиях:  $x = 0; z = z(t)$  или  $Q = Q(t)$  [4]  
( створ Ново-Село)

$x = 1; z = \text{пост. (створ М.Нягра)}$  [5]

Рис.1. Обычно используемые обозначения:  $z$  - отметка свободной поверхности,  $Q$  - расход,  $B$  - ширина русла,  $\omega$  - сечение стока,  $K$  - модуль расхода,  $x$  - измеренное расстояние по длине русла,  $t$  - время,  $g$  - гравитационное ускорение.<sup>1)</sup>

\*) Под числовой симуляцией паводков на реках авторы понимают процесс воспроизведения путем числовых методов паводковых волн в их хронологическом развитии как в реальных условиях, так и в заданных условиях, соответствующих возможным положениям или/и вариантам гидротехнического регулирования реки.

1) Рисунка не хватает.

Запись в конечных разностях производится с учетом отношений:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \approx \frac{1}{\Delta x} \left[ \Theta (F_{K+1}^{n+1} - F_K^{n+1}) + (1 - \Theta) (F_{K+1}^n - F_K^n) \right] \quad [6]$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} \approx \frac{1}{\Delta t} \left[ \frac{1}{2} (F_{K+1}^{n+1} + F_K^{n+1}) - \frac{1}{2} (F_{K+1}^n + F_K^n) \right] \quad [7]$$

где:  $K$  - расчетное сечение,  $n$  - время, а  $\Theta$  - коэффициент веса ( $0 \leq \Theta \leq 1$ ), который определяется из условия устойчивости и сходимости числового решения.

В конечном итоге приходим к системе уравнений записанной в матричном виде:

$$AV_{K+1}^{n+1} + BV_K^{n+1} + CV_{K+1}^n + DV_K^n = 0 \quad [8]$$

где:

$$V_{K+1}^{n+1} = \begin{bmatrix} Z_{K+1}^{n+1} \\ Q_{K+1} \end{bmatrix} \quad - \text{ вектор неизвестных переменных,}$$

а  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , - матрицы коэффициентов, которые выясняются в зависимости от характерных геометрических и гидравлических величин русла, а также от переменных  $Z$  и  $Q$  в момент  $n+1$ .

Система уравнений [8] имеет следующую структуру:

$$A_{K,K-1} Q_{K-1}^{n+1} + (B_{K,K-1} + C_{K+1,K}) Q_K^{n+1} + D_{K+1,K} Q_{K+1}^{n+1} = R_n \quad [9]$$

$$Z_K^{n+1} = Z_K^n + \Phi_{K,K-1} \quad [10]$$

Тридиагональный определитель коэффициентов уравнений [9] позволяет применение метода Якоби при нахождении путем последовательных приближений решения -

$$Z_K^{n+1}, Q_K^{n+1} \quad (K = 1, 2, \dots, N)$$

Принятый расчетный алгоритм характеризуется устойчивостью и сходимостью числовых решений. Выполненные исследования выявили критерии устойчивости и сходимости в виде:

$$\frac{1}{2} \leq \eta \leq 1 \quad a_{K+1} \cdot q_{K+1} < 1 \quad \text{где} \quad a_K = \frac{P_K}{1 - a_{K+1} \cdot q}$$

$$P_K = \frac{A_{K-1,K}}{B_{K-1,K} + C_{K+1,K}} \quad ; \quad q_K = \frac{D_{K+1,K}}{B_{K-1,K} + C_{K+1,K}}$$

Интересные выводы получают и относительно влияние различных членов уравнений [7] и [2] на числовые решения.

Составленный алгоритм был программирован на языке ФОРТРАН IV.

Тарирование расчетной модели производилось путем воспроизведения паводка на Дунае в 1970 году на всем участке, принадлежащем С.Р.Румынии, используя последние топографические съемки, гидрографы расходов притоков на обоих берегах, ежедневные измерения уровней на Дунае на гидрометрических постах и, частично, проведенные измерения расхода. Коэффициенты шероховатости в основном русле реки и в пойме на расчетных участках определялись с помощью процесса оптимизации, ставя условие воспроизведения с погрешностью меньшей  $\frac{1}{5-7}$  см по сравнению с уровнями наблюдаемыми на гидрометрических постах в период паводка, особенно, в зоне пика паводка.

На рисунку 2 показаны, для примера, на гидрографы уровней, измеренных и рассчитанных на нескольких гидрометрических постах. Совпадение очень хорошее, некоторые различия, возникающие в период увеличения - рисунок 2 - или спада уровней вызваны приближениями при расчете приливов притоков. Значения коэффициентов шероховатости находятся в пределах  $n_m = 0,020 - 0,030$  - для основного русла реки и  $n_m = 0,040 - 0,060$  - для поймы.

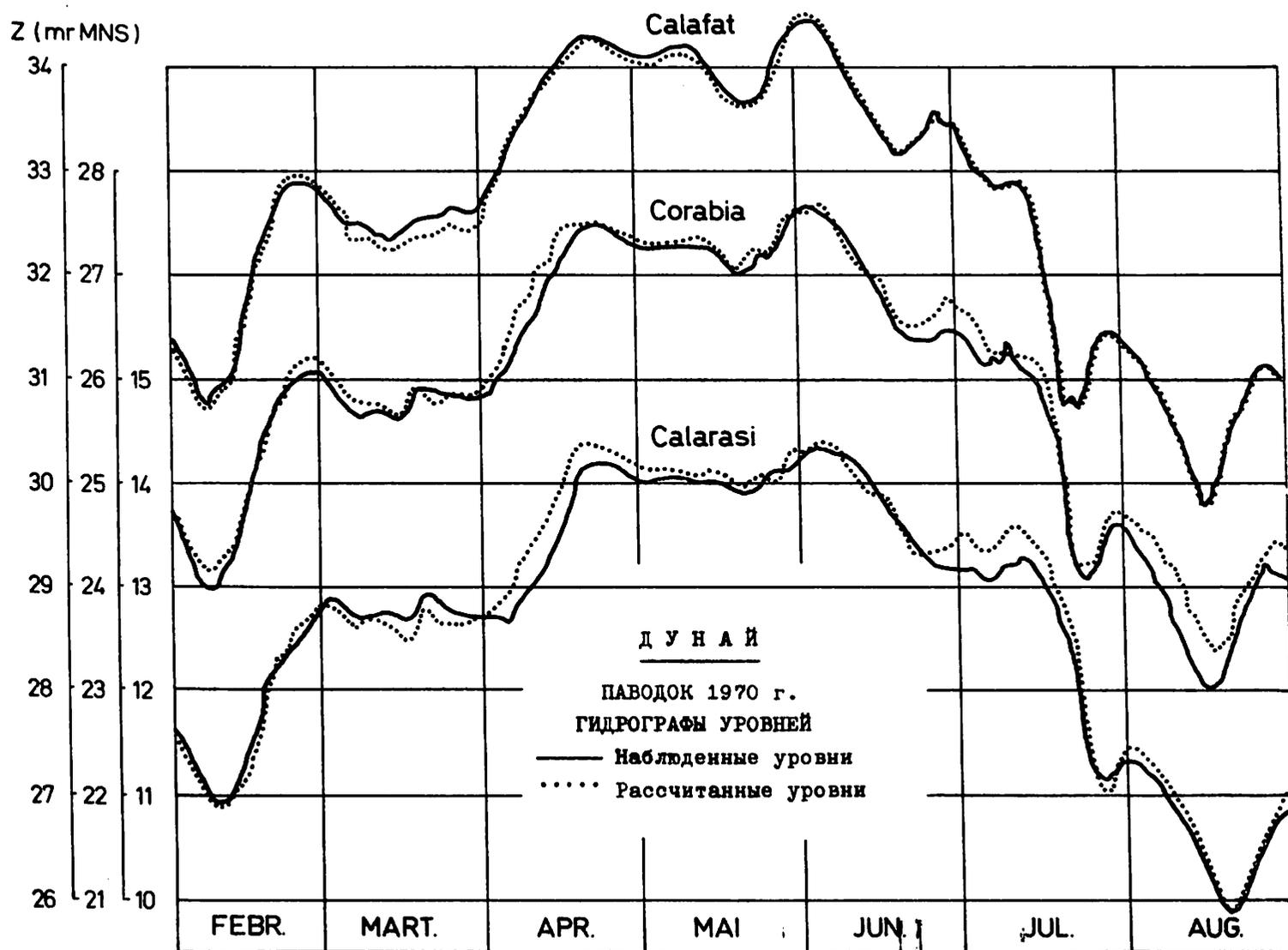


Рис. 2

Расчетная модель, тарированная таким образом, позволяет определить гидрографы расходов в каждом расчетном сечении, которые совместно с гидрографами уровней образуют семью значений - определяющую, фактически, кривые расхода воды в расчетных профилях.

Вариация на протяжении Дуная максимального расхода паводка 1970 года, полученная из расчетов, дается на рисунке 3, а на рисунке 4 приведены в качестве примера гидрографы расходов в различных сечениях.

Гидрографы расходов были вычислены для двух предельных условий в верхнем створе Ново-Село:  $z = z(t)$  - согласно ежедневным наблюдениям уровней и  $Q = Q(t)$ , допуская кривую расхода воды на данном посту.

Первое предельное условие более точное и дает возможность проверить и уточнить и кривую расхода воды в Ново-Село. Вытекает, что максимальный расход паводка в 1970 году в створе Ново-Село был около  $14.200 \text{ м}^3/\text{сек}$ , а при впадении в море максимальный расход достиг величины около  $17.000 \text{ м}^3/\text{сек}$ .

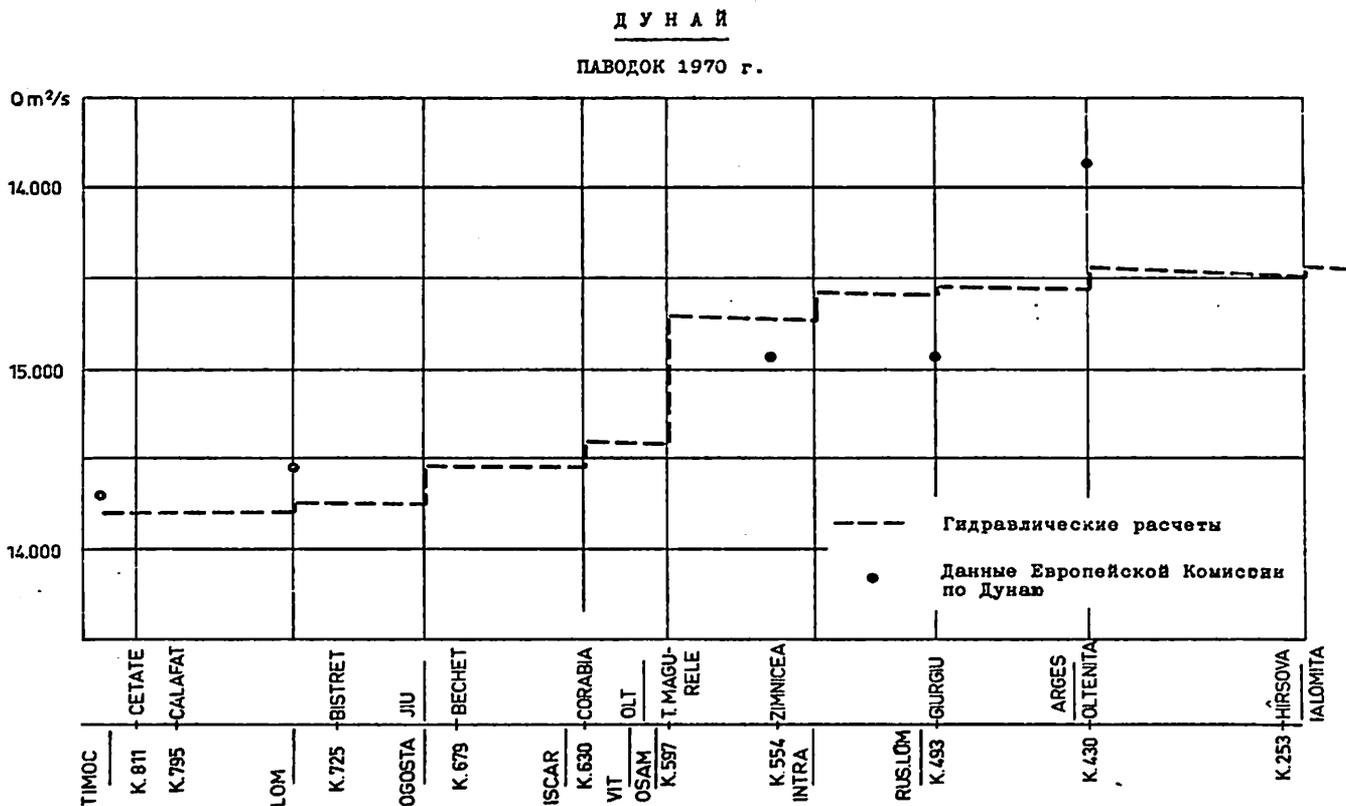


Рис. 3

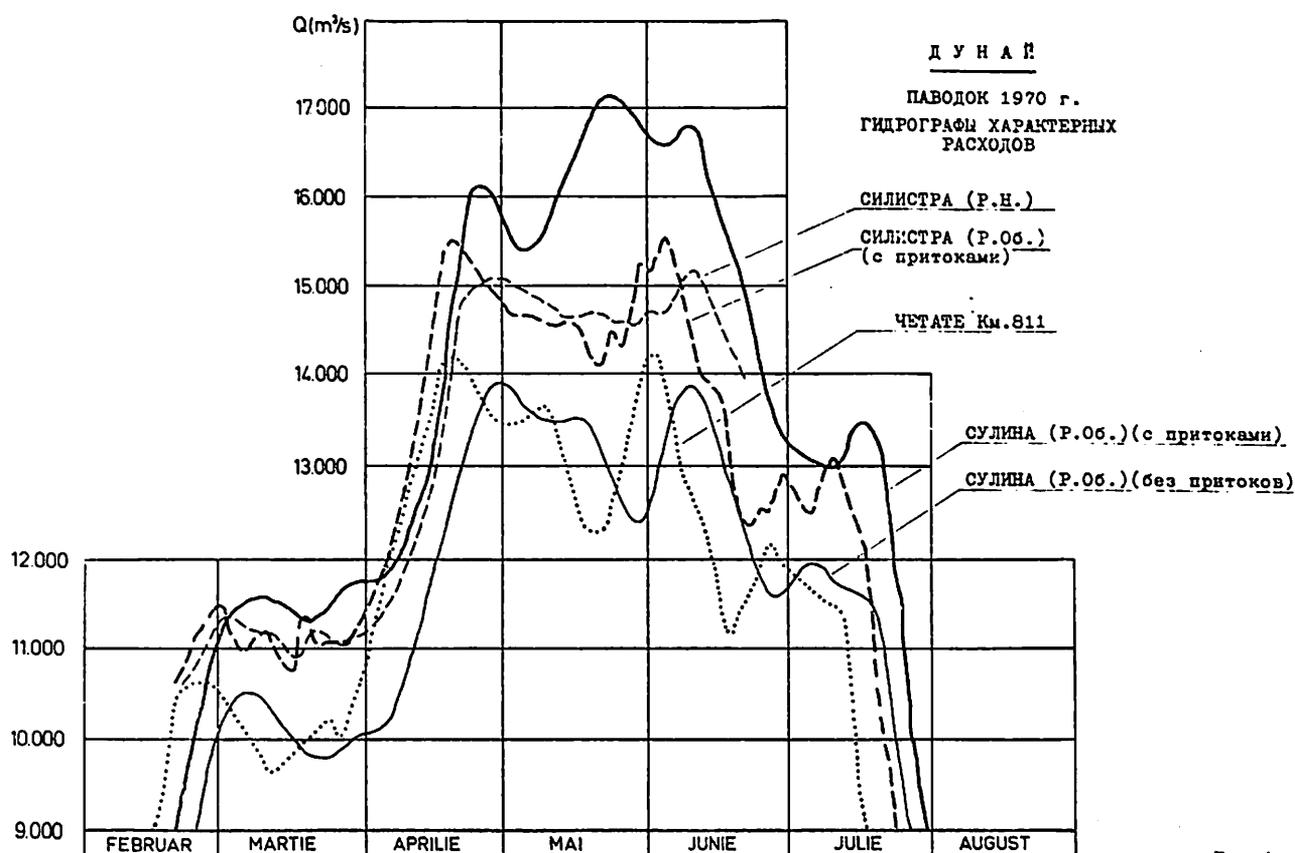


Рис. 4

На рисунке проводятся и гидрографы расходов в створе Сулина, рассчитанные как с учетом притоков на обоих берегах Дуная, так и без них. Заметно, что расплывание гидрографа расходов паводка 1970 года на участке ниже Ново-Село очень незначительно, порядка  $200 \text{ м}^3/\text{сек}$ . С другой стороны, явно преобразование паводковой волны на рассматриваемом участке, благодаря, в основном, участию притоков.

Кривые расхода воды, определенные на основании пар значений  $Q-Z$ , получаемых из гидрографов расходов и уровней в расчетных створах, имеют очень близкие две ветви (рост-спад), практически совпадающие, благодаря незначительному расплыванию паводковой волны в обвалованном русле. Изменения происходят только при участии притоков.

Для примера на рисунке 5 приводятся кривые расхода воды, полученные из расчетов на нескольких гидрометрических постах на Дунае, а также выполненные измерения расхода.

Видно, что измеренные и рассчитанные максимальные уровня практически одинаковы.

Расчетная модель паводка 1970 года на Дунае очень хорошо воспроизводит и другие паводки, имевшие место в годы после окончания обвалований.

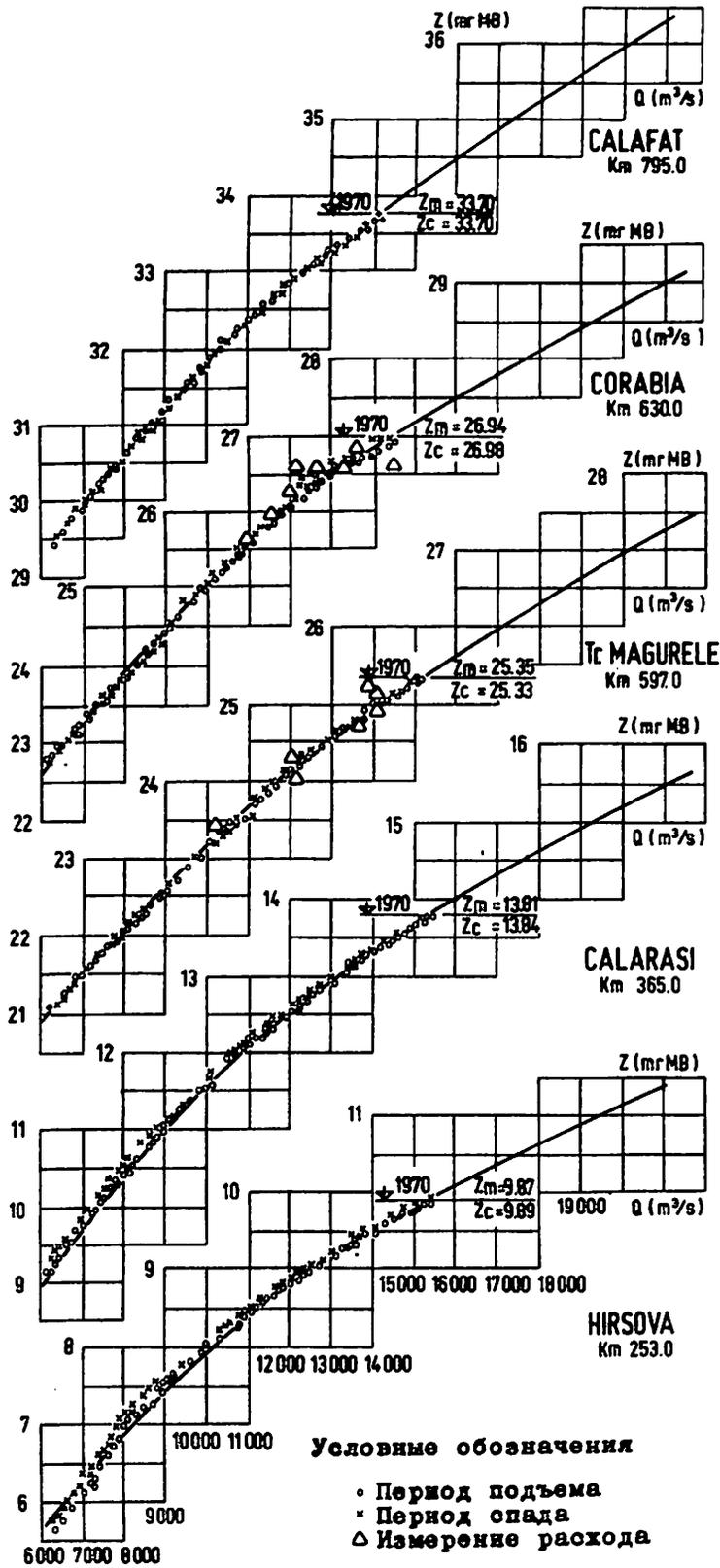
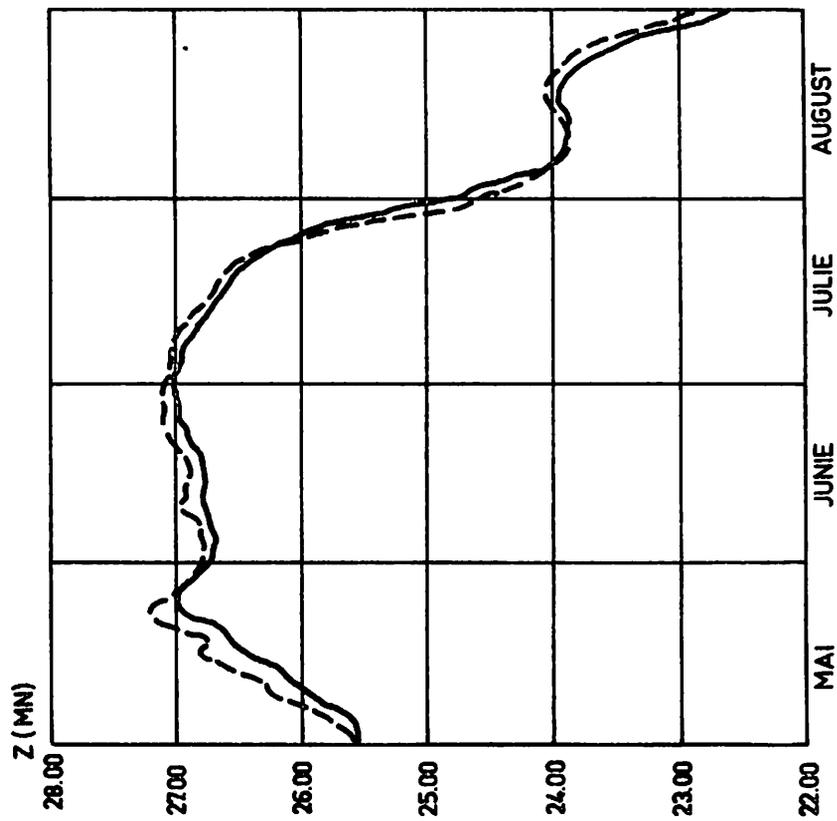


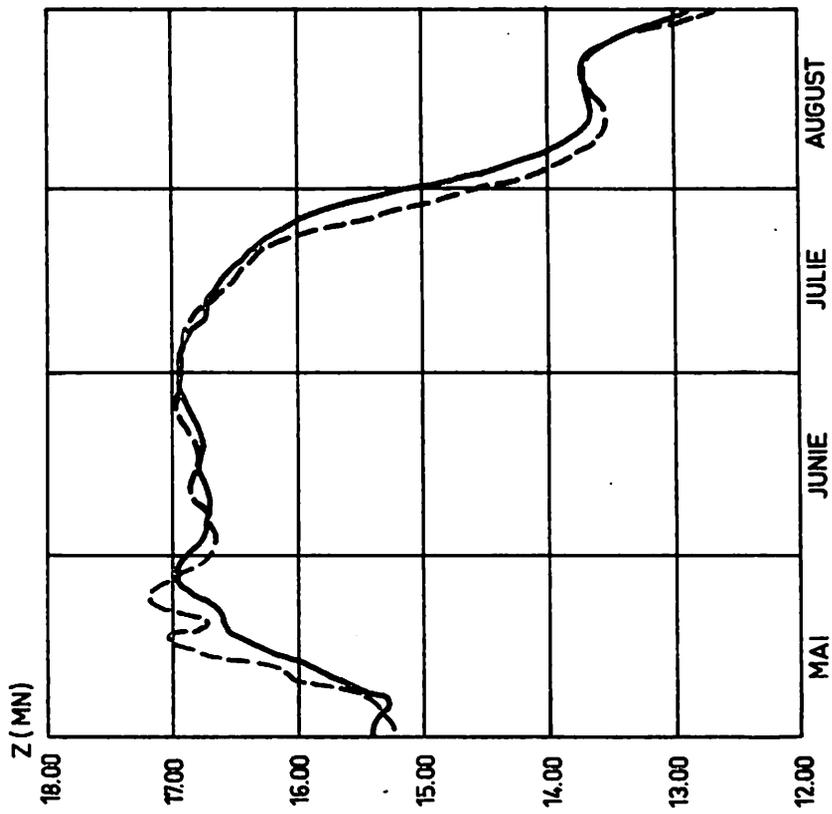
Рис. 5

ПАВОДОК 1965 г.

CORABIA  
Km. 630



OLTENITA  
Km. 430



— Зарегистрированные уровни

- - - - - Рассчитанные уровни

Рис. 6

В качестве примера на рисунке 6 показаны гидрографы измеренных и рассчитанных уровней на двух гидрометрических постах для паводка в 1965 году. Этот факт объясняется относительно устойчивым во времени геометрии русла Дуная на рассматриваемом участке (топогидрографические съемки в различные годы подтверждают этот вывод).

С помощью расчетной модели, тарированной на основе паводка 1970 года, транзитировалось в условиях обвалованного режима - около 25 ежегодных паводков, произошедших в прошлом, расход "пик" который превысил  $10.000 \text{ м}^3/\text{сек}$  в верхнем участке Дуная. Таким образом были получены значения гидрологического ряда ежегодных максимальных расходов при обвалованном режиме, на основании которого уточнялись максимальные расходы, обеспеченные в различных створах Дуная.

Одним из самых интересных применений расчетной модели паводка 1970 года на Дунае ниже Железных Ворот является расчет прогнозирования времени добегания паводков на данном участке. Зная гидрограф расходов на Дуная у Железных Ворот и допуская различные гидрографы расходов притоков, в зависимости от выпавших осадков в их гидрографических бассейнах, можно определить расходы и уровни которые будут на Дунае в различных створах. Имея ввиду, что у Железных Ворот можно прогнозировать расходы предварительно за 7 дней и что время добегания паводка от Железных Ворот до Черного моря равно около 10-11 дней, вытекает, что расходы и уровни на Дунае можно прогнозировать с предварительностью 12-14 дней в Олтенице и около 15-16 дней в портах Брэила и Галаць.

В то же время гидравлическая расчетная модель позволяет более рациональное составление программы измерения расходов при половодьях и более точную обработку этих измерений. Известен тот факт, особенно в условиях Дуная, что измерения расходов подвержены погрешностям, давая довольно значительные отклонения от отношения  $Q = Q(Z)$  в соответствующем створе (рис.5).

Классическими гидрологическими расчетами нельзя установить направления и величину этих отклонений как только в случае обнаружения систематических ошибок.

Но основываясь на гидравлических расчетах возможно предсказать приблизительную величину расхода, который будет определен измерениями в заданном створе и в заданный момент времени. Следовательно, можно составить программу измерений расходов в характерных створах так, чтобы уловить самые важные моменты физического явления стока, моменты, выявленные гидравлическими расчетами.

#### Выводы

а. Расчетная модель паводка 1970 года на Дунае в участке ниже Железных Ворот позволила составление ряда гидрологических данных, необходимого для статистических расчетов с целью определения обвалованного режима стока половодий на этом участке и уточнения соответствующих гидравлических элементов (кривые расхода воды, расходы, уровни, распластывание расходов, время добегания паводка и т.д.).

б. Как новые топографические съемки, так и гидравлический расчет паводка 1970 года, примененный к воспроизведению паводков других годов показали, что русло Дуная не подверглось морфологическим изменениям после обвалования поймы.

в. Расчетная модель стока половодий на Дунае, тарированная по паводку 1970 года, дает возможность, исходя из гидрографов расходов притоков и из гидрографа расходов во входном створе, гидравлически прогнозировать время добегания паводков на всем участке Дуная, принадлежащем нашей стране, используя преимущества ЭВМ. Период предсказания может быть от 7 до 17 дней, в зависимости от расстояния до рассматриваемого створа.

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ РЕЧНАЯ МОДЕЛЬ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ  
ДВИЖЕНИЯ ВОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ РУСЛАХ

Мартинка К., Зезулак И.

KINEMATISCHES FLUSSMODELL FÜR HOCHWASSER-  
WELLENBEWEGUNGEN IN NATÜRLICHEN GERINNEN

Martinka K., Zezulak I.

Резюме

В данной статье описана гидравлическая модель для решения неустановившегося движения воды в естественных открытых руслах, созданная на основе кинематических методов. Степень сложности схемы вычисления, которая легла в основу модели, зависит прежде всего от способа введения динамических условий. Система уравнений в предлагаемой статье помимо обыкновенной формы уравнения неразрывности включает также динамическое условие в виде уравнения установившегося движения воды как зависимость  $Q = f(h)$ . Эта комбинация дала возможность создать простую схему вычисления с простым алгоритмом и программированием для вычислительной машины.

Ввиду consistency разностных и дифференциальных уравнений предложенный числовой метод отличается одновременно достаточной стабильностью и экономией машинного времени, по отношению к динамическим методам при соблюдении достаточной точности решения.

Данная речная модель была разработана в двух вариантах, как для моделирования неустановившегося движения в общем русле, так и в форме, предназначенной для суточного прогнозирования на участке Дуная между Веной и Братиславой, с определенными изменениями, чтобы отвечала требованиям гидрологической службы информации и прогноза Гидрометеорологического института в Братиславе в ежедневной работе.

Zusammenfassung

In der vorgelegten Arbeit ist ein hydraulisches Modell für die Berechnung der instationären Strömung in natürlichen Flußgerinnen, das mit Hilfe kinematischer Methoden erarbeitet wurde, beschrieben. Der Schwierigkeitsgrad des Berechnungsschemas, welches die Basis des Modells bildet, hängt hauptsächlich von der Formulierung der dynamischen Bedingungen ab. Das Gleichungssystem in dieser Arbeit enthält, außer der üblichen Kontinuitätsgleichung, die dynamische Bedingung in Form einer Gleichung für stationäre Strömung als Abhängigkeit  $Q = f(h)$ . Dieser Ansatz hat die Aufstellung eines einfachen Berechnungsschemas mit einfachen Algorithmus und Programmierung für einen Digitalrechner ermöglicht.

Im Hinblick auf die dynamischen Methoden weist das angewendete Verfahren auch eine ausreichende Stabilität und Rechenzeiteinsparung bei Einhaltung genügender Lösungsgenauigkeit auf.

Das angegebene Flußmodell wurde in zwei Versionen ausgearbeitet: Für die nichtstationäre Strömung im Flußbett und für die 24-Stunden-Vorhersage in der Donaustrecke Wien-Bratislava. Dabei werden Umformungen berücksichtigt, die den Forderungen des hydrologischen Prognosedienstes im Hydrometeorologischen Institut in Bratislava entsprechen.

Гидрологические явления являются преимущественно результатом взаимодействия детерминистических и стохастических элементов природных процессов. Детерминистические компоненты, для которых были выведены физические законы и с большими или меньшими трудностями могут быть анализированы, создают вместе с стохастическими компонентами комплексную и неповторимую зависимость. Действительность, заключающаяся в том, какая из сторон при исследуемом явлении перевешивает - детерминистическая или стохастическая, влияет на выбор метода решения. В некоторых частях гидрологического цикла наши познания находятся уже на таком уровне, что мы можем считать влияние стохастических компонентов очень ограниченным и в пределах требуемой точности в крайнем случае его совсем опустить. Теперь мы перейдем к системному подходу при решении различных гидрологических проблем. По сравнению с остальными гидрологическими явлениями мы можем считать, что законы течения воды в речном русле могут быть выра-

жены гидродинамическим путем с определенной, для практики обычно удовлетворительной, точностью. Полнота физического выражения зависит от количества вводимых параметров и обуславливает комплексность модели. Ввиду того, что гидравлическая модель получается из физического значения этих параметров, ее основной чертой является способность выразить неустановившееся течение в общей речной системе без предварительного наблюдения режима стока. Мы имели эту цель при составлении конкретной речной модели для водотока с измеренным и неизмеренным режимом.

Речная модель разработана на основе кинематического подхода приблизительно со следующими целями:

сделать возможным моделирование катастрофических ситуаций стока в долгосрочном прогнозе,

позволить наблюдение за влиянием условий стока в реке и в ее окрестностях по отношению к подземным водам,

предоставить материалы для решения вопросов, возникших в связи с условиями стока, как, например, вопросы, связанные с охраной окружающей среды, с качеством воды, с перемещением наносов и т.п.,

наблюдать за влиянием главного водотока на режим притоков и наоборот,

осуществить анализ регулирования стока (особенно кратковременного) и предоставить материалы для манипуляции с гидротехническими сооружениями в интересах навигации, энергетики и борьбы с наводнением,

предоставить материалы для экономических исследований водохозяйственных мероприятий,

при совместной работе осадко-стоковой модели создать долгосрочный прогноз максимальных стоков для водотоков без предшествующих наблюдений,

предоставить оперативную и экономическую систему для краткосрочного гидрологического прогноза, моделирующую неустановившееся течение в водотоке с возможностью непрерывной коррекции решения на основе информации о уровне воды.

#### Математическая формулировка задачи

Задача общего непотенциального течения жидкости, как это представляют авторы книги (4), определена системой в консервативной форме

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \operatorname{div} F(U) = G(U) \quad [1]$$

где  $U$ ,  $F(U)$ ,  $G(U)$  являются символическими векторными функциями, из которых две последние составные. Данная запись законов ввиду своей консервативности является подходящей для выражения плавно переменного движения или скачкообразно переменного движения, когда не выполнены данные действия Наверовых-Стокесовых уравнений.

Физическое значение составляющих следующее:

составляющие вектора  $U$  выражают состояние массы, движения и энергии в определенном контрольном объеме,

составляющие вектора  $F(U)$  выражают течение этих величин на площади, ограничивающей контрольный объем,

составляющие вектора  $G(U)$  выражают увеличение этих величин в случае неконсервативного движения.

Для пространственной задачи с одной величиной действительно

$$U \equiv \begin{bmatrix} \rho \\ m \\ e \end{bmatrix}, \quad F(U) \equiv \begin{bmatrix} m \\ m^2/\rho + p \\ (e + p) \cdot m/\rho \end{bmatrix}$$

[2]

$$G(U) \equiv \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}$$

где

- $\rho$  - плотность
- $m$  - количество движения, приходящееся на единицу объема,
- $p$  - удельное давление,
- $e$  - удельная энергия,
- $f_1$  - функция, зависящая от количества поступающей внешней массы,
- $f_2$  - функция, зависящая от внешней силы, действующей на элементарный объем,
- $f_3$  - функция, зависящая от внешней энергии.

В системе уравнений двух зависимых переменных можно рассматривать только две зависимости. Поэтому уравнение энергетического баланса не будем принимать в расчет. Мы рассматриваем элементарный элемент линии тока с вольным уровнем в соответствии с рис.1, где

$b = b(x)$  - ширина перпендикулярная линии тока (м),

$h = h(x)$  - глубина тока (м),

$\Delta x$  - расстояние поперечных профилей, ограничивающее элемент (м),

$u$  - средняя скорость во вертикали сечения (м/с),

$\alpha$  - число Кориолиса,

$dz$  - увеличение глубины (м)

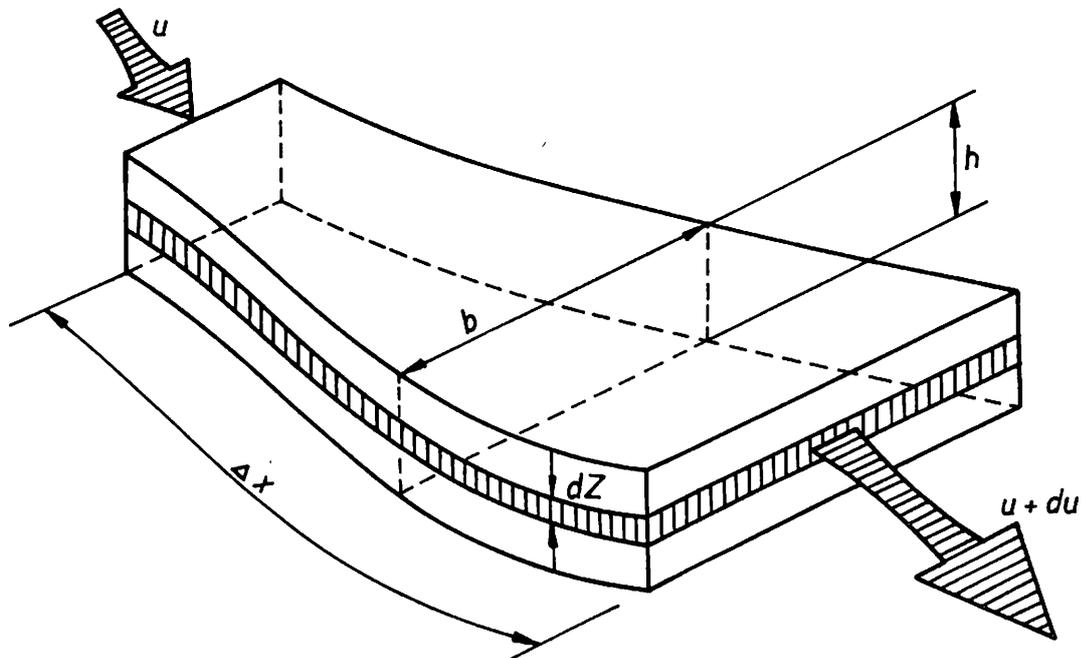


Рис.1. Элемент линии тока с вольным уровнем:  $b$  - ширина перпендикулярная линии тока (м),  $h$  - глубина течения (м),  $\Delta x$  - расстояние поперечных профилей, ограничивающее элемент (м),  $u$  - средняя скорость профиля по вертикали (м/сек),  $dz$  - увеличение глубины (м)

Затем мы выразим массу, количество движения в элементе и их ток, ограниченный плоскостью

$$\begin{aligned} \text{масса:} & \quad \rho b h \Delta x \text{ (кг)} \\ \text{количество движения:} & \quad \rho b h \Delta x u = M \text{ (кгм/с)} \\ \text{ток массы:} & \quad m \text{ (кгм/с)} \\ \text{Ток движения:} & \quad \alpha b \int (\rho g z + \rho u^2) dz = \left( \frac{1}{2} \rho g h^2 + \rho u^2 h \right) b \alpha \text{ (кгм/с}^2\text{)} \end{aligned}$$

Таким образом мы нашли действительную форму компонентов векторных функций  $U, F$  для рационального движения с одной величиной

$$U \equiv \begin{bmatrix} \rho h b \\ \rho h u b \end{bmatrix} \quad F(U) \equiv \begin{bmatrix} \rho h u b \\ \left( \frac{1}{2} \rho g h^2 + \rho h u^2 \right) b \alpha \end{bmatrix} \quad [3]$$

С помощью подстановки в уравнение [1] мы получим консервативную форму искомым зависимостей

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h b) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho h u b) = G_1(U) \quad [4]$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h u b) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} \alpha \rho g h^2 b + \alpha \rho h u^2 b \right) = G_2(U) \quad [5]$$

Составляющая  $G_2(U)$  включает член увеличения отдельного давления, вызванное радиальным движением, влияние внешней объемной гравитационной силы и другие (6).

$$G_2(U) = \frac{\partial b}{\partial x} \cdot \frac{1}{2} \rho g h^2 - \rho g h b I_d + G'(U) \quad [6]$$

Если мы введем геодезический горизонт  $H_0$  таким образом, что будет действительным  $H = h + H_d$ , мы получим зависимость (рис.2).

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial H_d}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + I_d \quad [7]$$

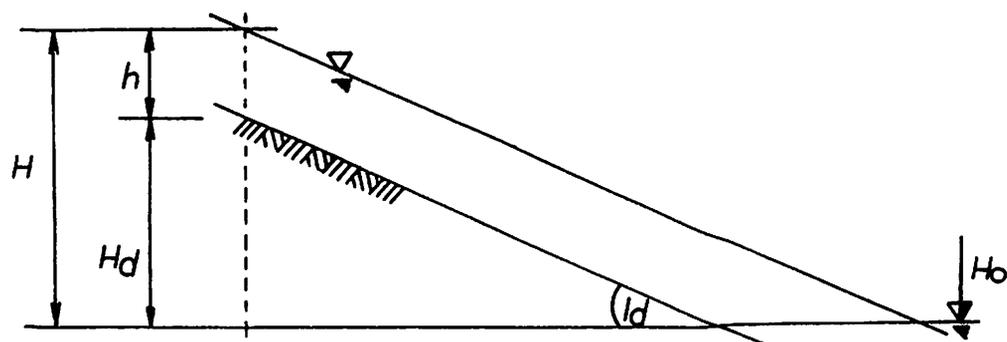


Рис.2. Продольный профиль:  $H_0$  - геодезический горизонт (м.н.м.),  $H_d$  - высота дна над выбранным геодезическим горизонтом (м),  $h$  - глубина течения (м)

Введением зависимости [6] и [7] в уравнение [4] и [5] и делением системы плотностью  $\rho$  мы получим

$$\frac{\partial}{\partial t} (hb) + \frac{\partial}{\partial x} (hub) = G_1(U)/\rho \quad [8]$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (hub) + \frac{\partial}{\partial x} (\alpha hu^2b) = -ghb \frac{\partial H}{\partial x} + G'(U)/\rho \quad [9]$$

если мы произвели деривацию суммы в уравнении [5], как окончательную зависимость для течения в элементе линии тока реки при условии, что  $x$  меняется с  $x$  очень мало. Кроме того мы предполагаем разделение реки на эти элементы линии тока и выразим общую площадь поперечного профиля в виде интеграла

$$A = \int_0^B hdb \quad [m^2] \quad [10]$$

и аналогично для расхода

$$Q = \int_0^B hudb \quad [m^3/s] \quad [11]$$

С помощью интегрирования уравнений [8], [9] для целой площади сечения уравнения неразрывности и уравнения движения, выраженной для этих зависимых переменных  $A$ ,  $Q$ ,  $H$  в виде

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = \int_0^B G_1(U)db \quad [12]$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} = \int_0^B G'(U)db \quad [13]$$

Теперь нам остается только выразить составляющую  $G_1$  в уравнении неразрывности, как источник внешней массы  $q$  ( $m^2/c$ )

$$\int_0^B G_1(U)db = q \quad [14]$$

и  $G'$  в уравнении движения, как внешнюю объемную силу под влиянием добавочного количества движения притекающего тока и силы трения  $I_t$  (рис.3).

$$\int_0^B G'(U)db = v \cos \varphi q - gI_t A \quad [15]$$

Для определения величины склона линии механической энергии мы обычно используем одно из выражений, используемых в гидравлике открытых русл, например,

$$I_t = \frac{Q|Q|}{c^2 A^2 R}$$

$c$  - коэффициент Шези.

Система гиперболических частных дифференциальных уравнений [12], [13] определяет одновременно с уравнениями [14], [15] структуру математической модели участка реки.

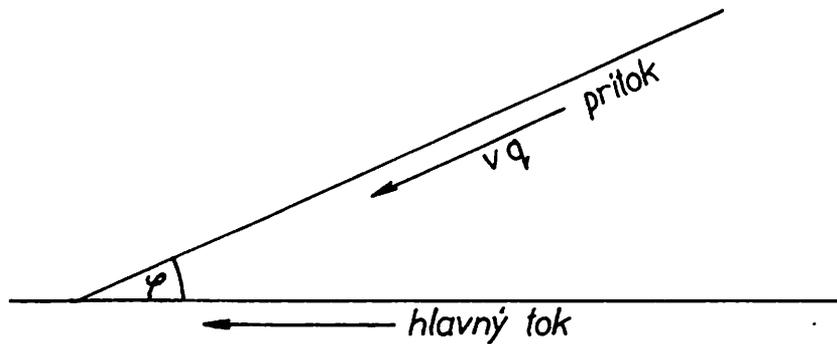


Рис. 3. Схема бокового притока:  $v$  - скорость бокового притока /м/сек/,  
 $q$  - притекающее количество на 1 метр главного тока /м<sup>2</sup>/сек/,  
 $\varphi$  - угол между главным током и притоком

Выведение основной дифференциальной системы,  
 подходящей для числового решения

Далее мы преобразовываем систему [12] - [15] для дальнейшего числового решения. Из уравнения неразрывности исключаем временные производные площади сечения

$$\frac{\partial A}{\partial t} = b_s \frac{\partial H}{\partial t}$$

введением новой переменной  $b_s$ , обозначающей фиктивную ширину русла. Таким образом кинематическое условие приобретает новый вид

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + b_s \frac{\partial H}{\partial t} = q \quad [16]$$

Для выведения вида уравнения движения необходима прежде всего пространственная производная члена  $\alpha Q^2/A$  на левой стороне уравнения [13] как

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) = \frac{2\alpha Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\alpha Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{Q^2}{A} \frac{\partial \alpha}{\partial x} \quad [17]$$

и затем мы должны исключить производную  $\partial A/\partial x$  с помощью введения второй фиктивной глубины

$$b_m = \frac{A}{H} \quad [m]$$

потом [18]

$$\frac{\partial A}{\partial x} = b_m \frac{\partial H}{\partial x} + H \frac{\partial b_m}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial x}$$

Введением зависимостей [17], [18] и одновременно уравнения [12] в уравнение [13] мы выводим окончательный вид динамического условия [19]

$$\frac{\partial Q}{\partial t} - \frac{2\alpha Q b_s}{A} \frac{\partial H}{\partial t} - \left[ \frac{\alpha Q^2}{A^2} \left( b_m + H \frac{db_m}{dH} \right) - gA \right] \frac{\partial H}{\partial x} = \left( \frac{2\alpha Q}{A} - v \cos \varphi \right) q - \frac{gQ|Q|}{c^2 AR}$$

при условии, что  $b_m$  изменяется со временем очень мало.

Составление разностных уравнений

Кинематическая модель получается из дифференциальной системы [16], [19], однако, в уравнении движения мы предполагаем отсутствие временной производной, тогда

$$gA \frac{\partial H}{\partial x} = - \frac{g |Q|}{c^2 A R} \quad [20]$$

при условии, что  $b_m$  равно нулю в результате удачно выбранного геодезического горизонта. С помощью преобразования мы затем получим

$$\frac{\partial H}{\partial x} = - \frac{|Q|}{c^2 A^2 R} \quad [21]$$

однако, согласно рис.2

$$\frac{\partial H}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} + I_d \quad [22]$$

и потом

$$Q = cA \sqrt{R \left( I_d + \frac{\partial h}{\partial x} \right)} \quad [23]$$

как окончательный вид динамического условия для установившегося состояния. Теперь мы уравнение [16] запишем в виде конечных передних разностей, центрированное в точке  $[\Delta x_j(j + 1/2), \Delta t(n + 1/2)]$ , где  $\Delta x$  шаг по длине (переменный) и  $\Delta t$  шаг по времени,  $j$  и  $n$  являются пространственным и временным индексом, (рис.4).

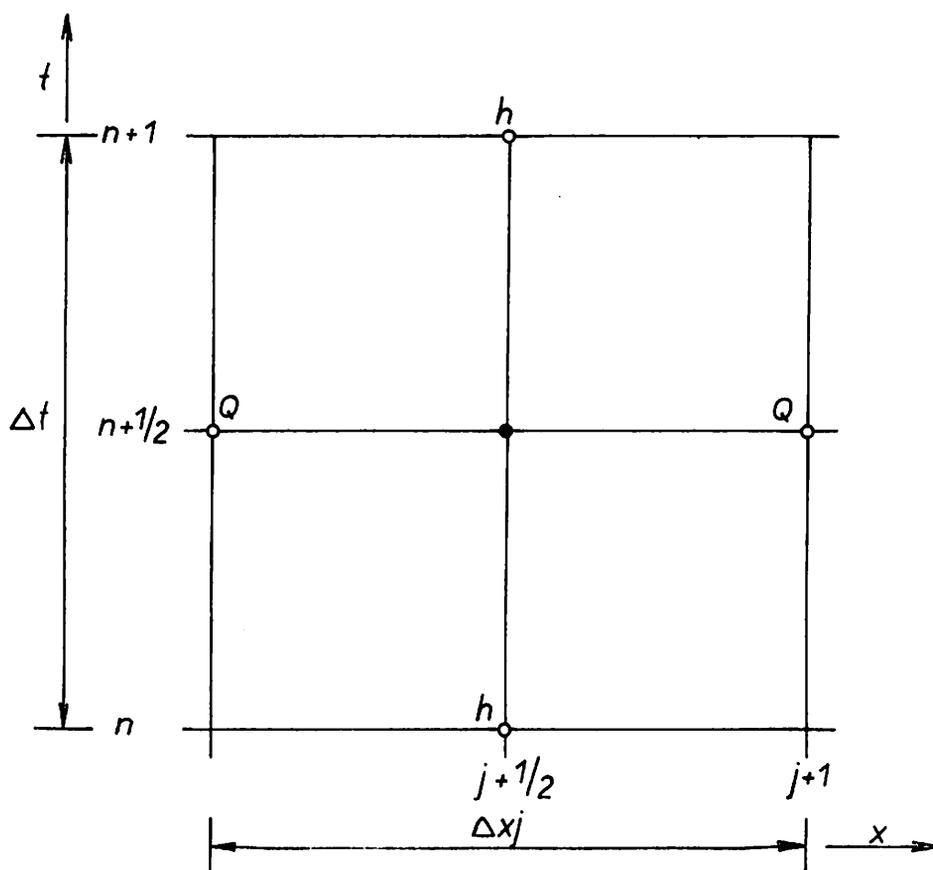


Рис.4. Размещение неизвестных  $Q$  и  $h$  в узловых точках плоскости  $(x, t)$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{h_{j+1/2}^{n+1} - h_{j+1/2}^n}{\Delta t} \quad [24]$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{j+1}^{n+1/2} - Q_j^{n+1/2}}{\Delta x_j} \quad [25]$$

При этом преобразовании разностная форма уравнения [16]

$$b_{s_{j+1/2}}^{n+1/2} \cdot \frac{h_{j+1/2}^{n+1} - h_{j+1/2}^n}{\Delta t} + \frac{Q_{j+1}^{n+1/2} - Q_j^{n+1/2}}{\Delta x_j} q_{j+1/2}^{n+1/2} = 0 \quad [26]$$

консистентна с исходным дифференциальным уравнением. Тесты схемы показали достаточную стабильность и конвергенцию решения при хорошо выбранном шаге по времени  $\Delta t$ . Оптимальный выбор шага по времени соответствует приблизительно характеристической скорости, т.е. выбору по условию Куран-Фридрих-Леви. Уравнение [26] вместе с уравнением [23] определяет разностную систему кинематической модели. Разностное уравнение помещено в промежуточном уровне по времени  $n+1/2$ , поэтому характер расчета неявный. Решение

$$h_{j+1}^{n+1} = \left[ \frac{q_{j+1}^{n+1/2} + q_j^{n+1/2}}{2} - \frac{Q_{j+1}^{n+1/2} - Q_j^{n+1/2}}{\Delta x_j} \right] \frac{4 \Delta t}{b_{s_{j+1}}^{n+1/2} + b_{s_j}^{n+1/2}} -$$

$$- h_j^{n+1} + h_{j+1}^n + h_j^n$$

поэтому необходимо уточнять постепенными итерациями. Для выражения выходного расхода из элемента  $\Delta x_j$ , мы используем зависимость

$$Q_{j+1}^{n+1/2} = M_{j+1}^{n+1/2} \sqrt{I_d + \frac{h_{j+1}^{n+1/2} - h_j^{n+1/2}}{\Delta x_j}} \quad [28]$$

где модуль расхода  $M_{j+1}^{n+1/2}$  является функцией глубины в среднем уровне по времени и выходном профиле  $j+1$  из элемента. Обычно мы его можем выразить, как

$$M_{j+1}^{n+1/2} = c_{j+1}^{n+1/2} A_{j+1}^{n+1/2} \sqrt{h_{j+1}^{n+1/2}} \quad [29]$$

В качестве речных параметров кинематической модели мы выбрали:

фиктивная ширина уровня  $b_3$  (м),

кривая измерения  $Q \equiv Q(h)$  (м<sup>3</sup>/с)

Фиктивная ширина  $b_3$  определена как соотношение

$$b_s(h) = \frac{A_s(h)}{\Delta x_j}$$

Кривая измерения определена зависимостью  $Q \equiv Q(h)$ , в нашем случае была получена обычными методами гидравлики и на основе прямых гидравлических измерений.

Схема расчета кинематической модели отвечает решению речного и быстринного течения. В качестве верхнего краевого условия предполагается знание  $Q = Q(t)$  и при помощи зависимости

$Q = Q(h)$  в точке  $j = 1$  выведена зависимость  $h = h(t)$ . За нижнее краевое условие в профиле  $j = jj$  можно взять исключительно зависимость  $Q = Q(h)$ . Случай, в котором нижнее краевое условие определено иначе, должен иметь дополненное решение речной модели водоемом, находящимся в замыкающем створе. Аналогичным образом мы должны подходить и к кинематическому решению слияния рек, особенно в тех случаях, где нельзя опустить обратную связь между главным водотоком и притоком.

#### Стабильность и точность решения

Из физического контекста выливается условие для выбора отношения  $\Delta x / \Delta t$  из условия характеристических скоростей рассматриваемого течения, выраженных приблизительно зависимостью  $c^{\pm} = u^{\pm} \sqrt{gh}$ . Эту действительность лучше всего объясняет рис.5, выражающий ход характеристик в граничных точках области  $2\Delta x$ . Решение речного течения на участке длины  $2\Delta x$  определено только внутри треугольника из кривых  $\Delta 123$ , ограниченного осью  $x$  и характеристиками  $c_{\pm}$ . Характеристики являются окраинными носителями информации из области  $2\Delta x$ ; поэтому любой перенос информации из области  $2\Delta x$  за пределы  $\Delta 123$  физически невозможен. Поэтому мы утверждаем, что решение задачи в пространственной области  $2\Delta x$  физически реально только в пределах  $\Delta 123$ . В случае явных числовых схем это условие необходимо соблюдать для выбора соотношения расчетного шага времени  $\Delta t$  и шага длины  $\Delta x$ . Годится (с определенным ограничением) условие Курана-Фридрих-Леви, которое определяет

$$|c^{\pm}| \leq \frac{\Delta x}{\Delta t_c} ; \Delta t_c \leq \frac{\Delta x}{|c^{\pm}|}$$

где  $t_c$  характеристический шаг по времени.

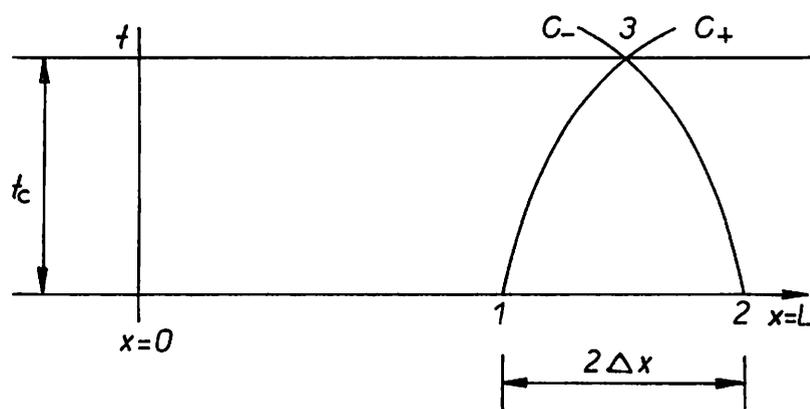


Рис.5. Ход характеристик  $c^{\pm}$  в предельных точках области

#### Входные данные кинематической модели

Кинематическую модель мы разработали в двух вариантах:

Вариант 1 общее представление модели для моделирования неустановившегося течения в общем русле,

Вариант 2 конкретное представление модели, как части системы для 24-часового прогноза расходов на Дунае на участке Вена-Братислава при усмотрении суточной коррекции решения.

Блок входных величин модели ВАРИАНТА 1 содержит следующие совокупности:

константы:

LOGICAL INTRE  
 INTEGER NN, JJ, LL, IPP, NNPRINT  
 REAL DT, GRAV, EPS, TSCALE, DH

функции пространства:

LOGICAL LI (J), L2(J), L3(J) (J = 1, JJ)  
 REAL DX (J), HBOTTOM (J), HMIN(J)  
 J = 1, JJ)

параметры реки:

BST(J,L), DISCH(J,L), QMODE(J,L)  
 ((J = 1, JJ), L = 1, LL))

исходные глубины:

HINIT(J) (J = 1, JJ)

верхнее краевое условие и боковые расходы:

QIN, QLAT предполагаем, что они подготовлены в виде хронологических линий и расположены в соответствующей последовательности. Созданы особыми программами SCHEM и LMIX, которые являются составной частью системы.

Значение данных переменных:

INTRE: = требуется печать некоторых промежуточных результатов?  
 NN максимальное количество уровней по времени  
 JJ максимальное количество узловых точек j  
 LL максимальное количество дискретных точек речных параметров  
 IPP максимальное допустимое количество циклов итерации  
 DT шаг времени (сек)  
 GRAV гравитационное ускорение (м/сек<sup>2</sup>)  
 EPS предписанная точность (м)  
 TSCALE трансмиссионный фактор для расчета редуцированного времени (сек)  
 DH шаг глубины, соответствующий LL дискретных точек для определения промежуточных величин речных параметров (м)  
 NNPRINT индекс, ликвидирующий печать нежелательных уровней по времени  
 L1(J) : = кривая измерения для этого j рассчитана?  
 L2(J) : = модуль расхода для этого j рассчитан из кривой измерения?  
 L3(J) : = принимается во внимание в этом j боковой приток?  
 DX(J) : = шаг длины (м)  
 HBOTTOM(J) высота дна над у.м. (м.н.м.)  
 HMIN(J) минимальный уровень в водотоке, определяющий начала кривых RP (м.н.м.)  
 BST фиктивная ширина уровня b<sub>3</sub> (м)  
 DISCH (QMODE расход) модуль расхода, читается в зависимости от L1(J) (м<sup>3</sup>/сек)  
 HINIT(J) исходные глубины (м.н.м.)  
 QIN, QLAT верхнее краевое условие, боковые притоки в зависимости от L3(J) (м<sup>3</sup>/сек)

Блок входных данных модели ВАРИАНТА 2 создан особой программой в рамках системы так, чтобы объем необходимых внешних информации был минимальным. Эта подготовительная программа требует совокупность:

```

REAL W2, W3, B2
REAL QDK(M) (M = 1,3)
REAL QM(M) (M = 1,3)

W2    уровень воды в Вене (м)                "СЕГОДНЯ"

W3    уровень воды в Вене (м)                "ЗАВТРА"
      7,00 час
      (прогноз)

B2    уровень воды в Братиславе (м)          "СЕГОДНЯ"
      7,00 час

QDK(1) расход в Донау-канале (м3/сек)      "ВЧЕРА"
      7,00 час

QDK(2) расход в Донау-канале (м3/сек)      "СЕГОДНЯ"
      7,00 час

QDK(3) расход в Донау-канале (м3/сек)      "ЗАВТРА"
      7,00 час (прогноз)

QM(1) расход в Мораве (м3/сек)             "ВЧЕРА"
      7,00 час

QM(2) расход в Мораве (м3/сек)             "СЕГОДНЯ"
      7,00 час

QM(3) расход в Мораве (м3/сек)             "ЗАВТРА"
      7,00 час (прогноз)

```

Остальные данные система автоматически ищет в расчетах предыдущего дня и производит коррекцию, или сама создает.

#### Алгоритм кинематической модели

```

1000  вход блока данных
2000  для отдельных уровней по времени
      2100  для отдельных профилей j:
            2110  для отдельных циклов итерации (ограниченных критерием KRIT)
            2111  расчет неизвестной глубины из уравнения (27)
            2112  выведение соответственного расхода из кривой Q = Q(h)
            2113  если не выполнен критерий KRIT, возвращение к 2110
            2114  если не исчерпано количество jj, возвращение к 2100
            2115  печать решения для этого уровня по времени
      2200  перемещение новых исходных условий для следующего уровня по времени
      2300  если не исчерпано количество pp, возвращение к 2000
3000  конец расчета

```

#### Использование модели

Программы вышеупомянутого принципа на языке Fe1 - Fortran IV, для ЭВМ МИНСК 22,32 находятся в Гидрометеорологическом институте в Братиславе и на Кафедре основ водного хозяйства АФ Сель.и-та в Праге. Для проверки речной модели был использован участок Дуная между Веной и Братиславой. Русло реки мы по возможности разделили равномерно на 26 отдельных участков, т.к. большая разница между отдельными  $\Delta x$  вызывает необходимость выбора шага по времени  $\Delta t$ , соответствующего самому короткому  $\Delta x$ . Соблюдая условие Куранта-Фридрих-Леви и то, о чем мы уже сказали, мы установили минимум  $\Delta t$  так, чтобы могла быть найдена числовая стабильность решения при выбранном шаге времени  $\Delta t = 450s$ . На рис.6 дана фактическая и рассчитанная волна. Для экономического сравнения, время расчета на ЭВМ МИНСК 22 для 24-часового прогноза равно 18 минутам машинного времени. Проявление модели ВАРИАНТА 2

предоставит информацию о гидрограмме в замыкающем створе в Братиславе и одновременно продольный профиль реки в 2-часовых интервалах на участке Вена-Братислава. Из полученных результатов vyplывает, что данная речная модель может быть использована в прогнозе для краткосрочных прогнозов речных расходов или уровня воды в русле особенно там, где нет предшествующих наблюдений и параметры русла можно вывести гидравлическим путем.

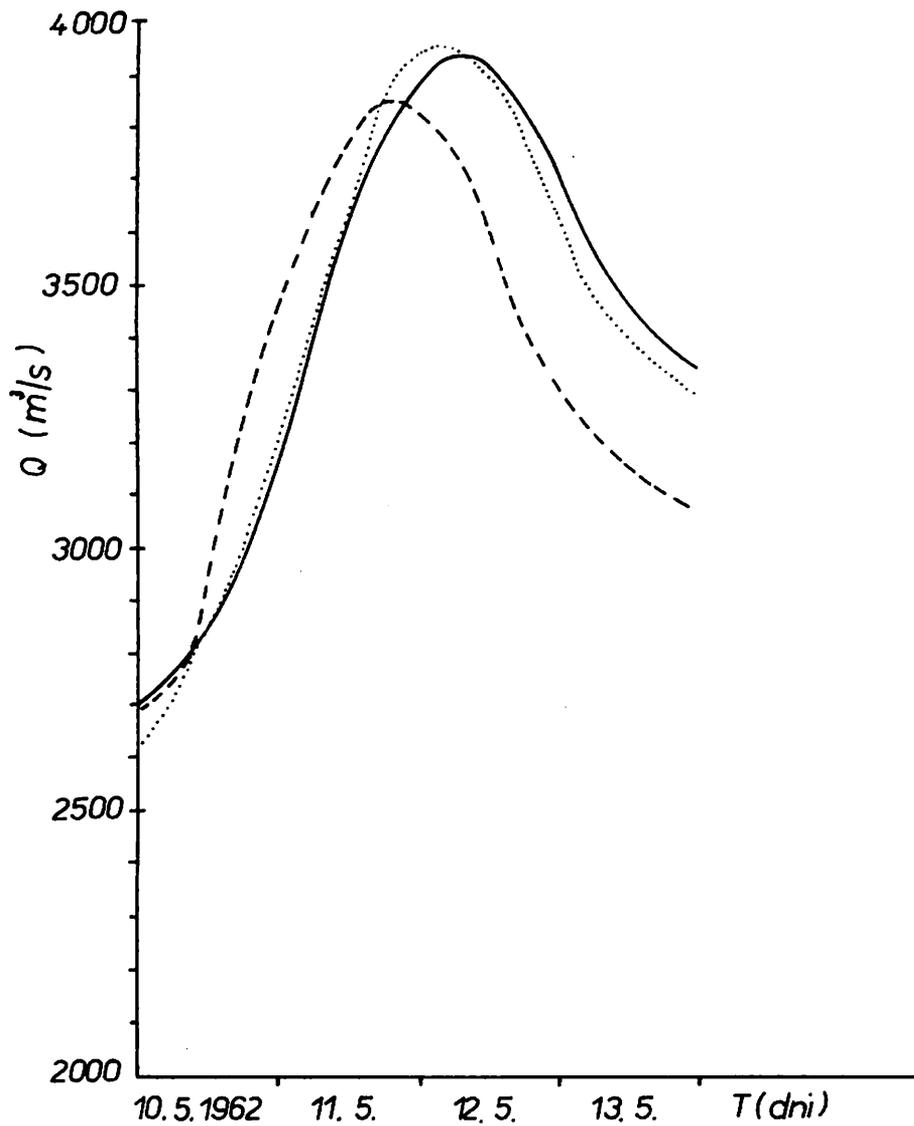
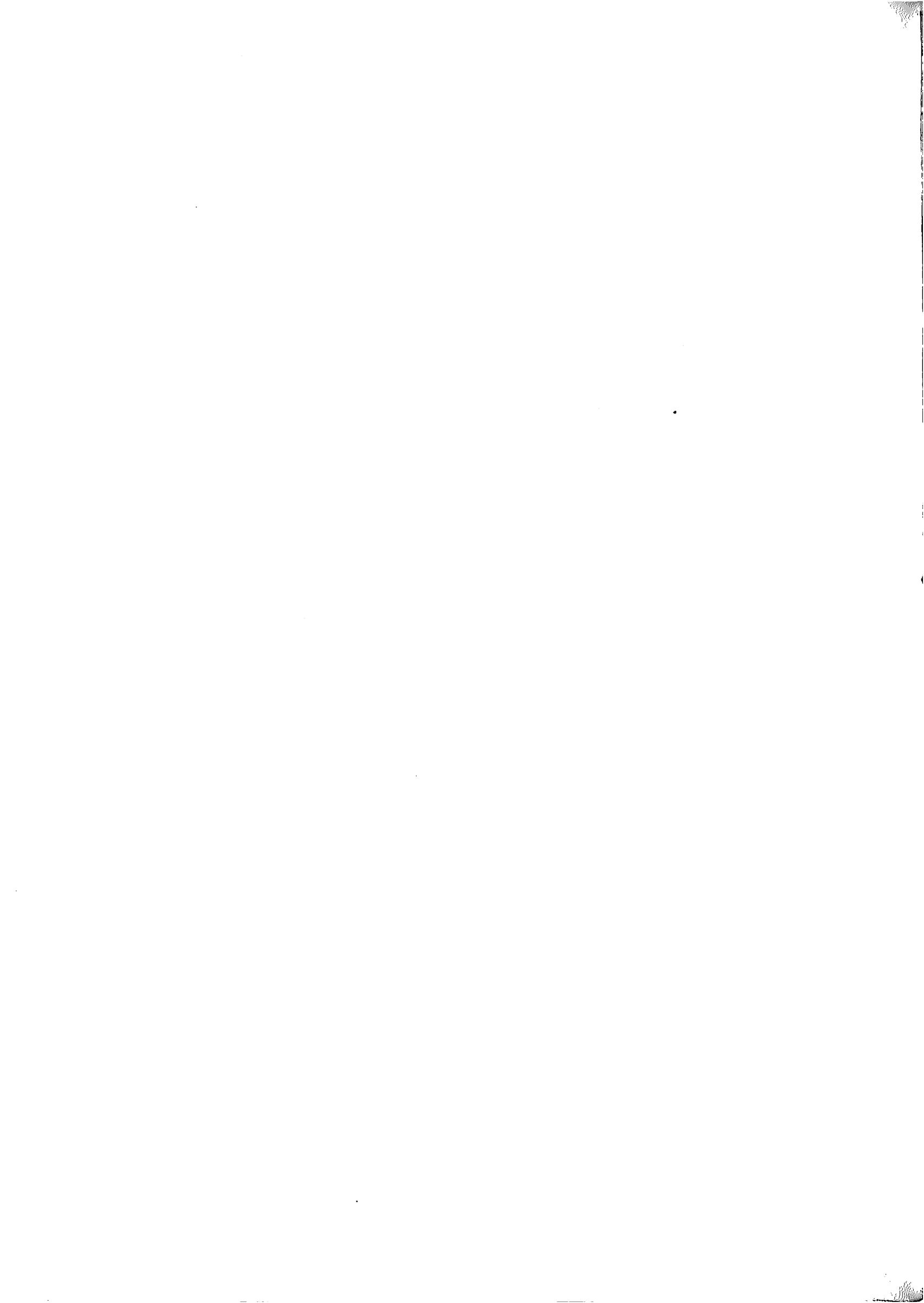


Рис.6. Сравнение фактической и рассчитанной гидрограммы в профиле Братислава:  
 — фактическая волна, ..... рассчитанная волна,  
 - - - фактический ход гидрограммы в профиле Вены

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Abbot, M.B.,  
Ionescu, F.                      On the numerical computation of nearly horizontal flows. Journal of Hydraulic Research 5, 1967. c.2
2. Kosorin, K.                      Posúdenie chyby kinematickej j metódy a výpočet vlnového prietoku. Vodohospodársky časopis, 21, 1973, č.3-4, s.400-409
3. Martinka, K.,  
Zezulák, J.                      Predpoved povodňových prietokov na Dunaji, stredných a dolných tokoch Slovenska. Výskumná správa HMÚ, Bratislava, 1973
4. Richtmyer, R.D.,  
Morton, K.W.                      Difference methods for initial value problems. New York, Wiley 1967
5. Verhoog, F.H.                      Numerical method for computation of flood waves in rivers. Delft, International Courses in Hydraulics and Sanitary Engineering 1969
6. Verwey, A.                      Mathematical model for flow in rivers with realistic bed configuration. Delft, International Courses in Hydraulics and Sanitary Engineering 1971
7. Zezulák, J.                      Některé možnosti modelování neustáleného proudění v otevřených korytech. Sborník konference MLVIH ČSR a VÚV Praha, Úloha vědy ve vodním hospodářství, Praha 1972.



ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ И ТЕРРИТОРИАЛЬНО ОБЩАЯ МЕТОДИКА  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ И ГИДРОГРАФОВ  
ПАВОДКОВ ГОРНЫХ РЕК

Бефани Н.Ф.

PRINZIPIELLE GRUNDLAGEN UND METHODIK DER VORHERSAGE  
FOR SCHEITELABFLOSSE UND HOCHWASSERGANGLINIEN VON  
GEBIRGSFLOSSEN

Befani N.F.

Резюме

Многообразие генезиса стока требует регионального подхода к моделированию паводков. Для Карпат получена математическая модель, включающая в себя поверхностную и дренажную составляющие паводочных расходов. Совместный анализ экспериментов и данных наблюдений на опорной сети позволил связать параметры модели с факторами, распределение которых по территории и ход во времени известны. Методика обладает хорошей точностью.

Zusammenfassung

Hochwasseruntersuchungen des Autors in verschiedenen Einzugsgebieten haben ergeben, daß der Aufbau von Hochwasserwellen durch unterschiedliche physikalische und topographische Verhältnisse wesentlich beeinflußt wird. Somit kann ein einziges Modellkonzept nicht für alle Einzugsgebiete angewandt werden.

Es wurden mathematische Modelle zur Berechnung der Scheitelabflüsse und Abflußganglinien für Einzugsgebiete erarbeitet, die denen der Ostkarpaten ähnlich sind, unter Berücksichtigung des Oberflächenabflusses im Flußbett und des oberflächennahen Abflusses in den lockeren alluvial-diluvialen Schichten über dichten Gesteinen. Die theoretischen Modelle ergeben Näherungslösungen, die mit Hilfe von Naturbeobachtungen überprüft und verbessert wurden. Für alle Gebiete wird ein einheitlicher Ansatz zur Ermittlung des Verlustgliedes und des Basisabflusses verwendet, worüber der Verfasser bereits auf der 6. Konferenz der Donaustaaten berichtet hat.

Es wurden erarbeitet die Bestimmung der kritischen Regenintensität, die einen entscheidenden Einfluß auf den Oberflächenabfluß an Waldhängen oder freien Abhängen hat, sowie das analytisch-graphische Verfahren der Trennung der Abflußkomponenten des Oberflächen- und oberflächennahen Hochwasserabflusses.

Zum Schluß werden Überlegungen zur Nutzung der erhaltenen Formeln für andere Regionen des Donaeinzugsgebietes dargelegt.

Анализ данных экспериментальных исследований, поставленных в разных физико-географических условиях, и материалов натуральных наблюдений показывает, что генезис паводочного стока меняется по территории и во времени. Такие генетические типы склонового стока как поверхностный подвешенный, подпертый поверхностный в зоне высоких грунтовых вод, горный поверхностный подпертый или подвешенный, зарегулированный в прирусловых осыпях, селевой, горный контактный (дренажный, жильный, пластовый), смешанный болотный, внутрпочвенный равнинный (подпертый или подвешенный), надмерзлотный и другие своеобразны как по функциональному виду зависимости стока от его факторов, так и по составу последних.

При всем многообразии процессов формирования стока, существуют обширные территории (регионы), однотипные по генезису паводков, а значит и по виду зависимостей стока от действующих факторов. Таким образом, нельзя разрабатывать универсальную единую математическую модель паводков. Общие закономерности процесса по разному раскрываются в разных регионах и территориально общие методы прогнозирования паводков могут основываться только на региональном подходе.

Анализ показал, что территория Карпат с ее комплексом климатических, почвенных, геологических, геоморфологических и гидрографических условий, может рассматриваться как регион паводочного стока. Главной особенностью региона является наличие двух генетических типов стока - контактно-дренажного и подвешенного поверхностного, зарегулированного в прирусловых осыпях и, лишь местами, переходящего в подпертый. Для формирования математической модели максимального расхода и гидрографа паводочного стока рек Восточных Карпат потребовалась разработка теории процессов поверхностного стока, зарегулированного в прирусловых осыпях, и подповерхностного стока в рыхлом дренирующем слое аллювиально-делювиального чехла по контакту с плотными породами.

В основу теории видов стока положены дифференциальные уравнения, учитывающие элементы водного баланса, в том числе и временное задержание воды на склонах в малопроточных депрессиях при поверхностном стекании и мелкозернистых слоях почво-грунта, регулирующих дренажное стекание. В существующих теориях процессов стока их трех форм аккумуляции на склоне (ручейковая или дренажная, временное поверхностное или почвенное задержание и безвозвратное задержание тех же видов) учитывают только первую. Между тем, сечение малопроточных депрессии при слабых уклонах поверхности зачастую во много раз превышает живое сечение ручьев. Точно также объем дрен.жил. пластов контактного стока, обычно, меньше емкости сопряженных с ними мелкозернистых пород, заполняющихся на подъеме и длительное время питающих дренажные прослойки на спаде стока. Теоретические решения показали большую роль временного задержания, под влиянием которого гидрограф притока с горных склонов, а ровно и с плоских заболоченных равнинных территорий, сильно расплывается - максимум запаздывает, снижается, а продолжительность значительно возрастает. Постоянное задержание определяется как элемент потерь стока. В связи с ограниченностью пропускной способности дренирующего слоя режим контактного стекания может быть свободным или подпорным. Для последнего случая удалось найти только приближенное решение. Были получены теоретические уравнения гидрографа и формулы максимальных расходов для всех основных типов склонового стока, фаз и форм стокообразующих процессов.

Интегрирование уравнений руслового стока с учетом русло-пойменного водообмена приводит к генетической формуле вида

$$Q_t = \int_0^t \epsilon_t q_t \frac{\partial f}{\partial \tau_p} d\tau \approx \epsilon_p q_0 F \quad [1]$$

Здесь  $f$  - подизохронная площадь;  $\frac{\partial f}{\partial \tau_p}$  - функция добегания;  $\tau_p$  - время руслового добегания;  $q_t$  - модуль склонового притока в момент  $t$ ;  $\epsilon_t, \epsilon_p$  - коэффициенты русло-пойменного водообмена (пойменного задержания) в момент  $t$  и в среднем за паводок;  $q_0$  - модуль стока, определенный по методу изохрон;  $F$  - площадь бассейна.

В основу модели максимальных расходов рек Карпат следует положить схему многослойного движения, подразделяя контактный сток по нескольким интервалам скорости или времени добегания. Обобщая полученные теоретические выражения склонового притока, суммируя разные его виды и учитывая [1], можно представить формулу максимального руслового стока в виде:

$$Q_m = \epsilon_0 f_n \frac{S_{np}}{\tau_n + \tau_p} + \sum \epsilon_{ki} f_{ki} \frac{S_{kpi}}{\tau_{ki} + \tau_p} \epsilon_p F \quad [2]$$

Здесь  $S_{np}$  - слой водообразования (разность слоя дождя и поверхностного впитывания) за время поверхностного склонового добегания  $\tau_n$  в сумме с русловым  $\tau_p$ ;  $f_n$  - доля поверхностного водообразования в общем;  $\epsilon_0$  - коэффициент временного задержания поверхностных вод в прирусловых осыпях и аллювии. Компоненты 2-го, 3-го и т.д. членов имеют тот же смысл, но относятся к разным слоям подповерхностного стока;  $S_{kpi}$  означает контактное водообразование (впитывающиеся осадки за вычетом задержания и инфильтрации в подстилающий водоупор), приходя-

щеется на  $i$ -й отсек почво-грунта за время добегаия  $\tau_{ki} + \tau_p$ .

Ранее для региона Карпат были получены территориально общие формулы, связывающие суммарные потери на почвенное задержание и инфильтрацию в подстилающий относительный водоупор с осадками, индексом предшествующего увлажнения  $I_w$ , временем и бассейновыми параметрами (1). Об определении  $I_w$  по осадкам и температуре воздуха см. (2). По данным экспериментов (дождевание, напуск, инфильтрационные съемки и др.) устанавливались соотношения между потерями на разных видах поверхности, по которым затем распределялись наблюдаемые побассейновые потери, что позволило определить региональные параметры потерь. По региональным формулам потерь нетрудно вычислить общие слои водообразования - сумму поверхностного и контактного. Для обоснования метода расчета максимальных расходов необходимо распределить водообразование и сток на поверхностную и контактную составляющие.

Выражение [2] можно преобразовать в модельное уравнение, удобное для решения обратных задач по вычисленному ходу общего водообразования. Для этого достаточно выразить компоненты формулы [2] через слои общего водообразования, взятые в разных предшествующих интервалах времени. Такое преобразование дает формулу модуля контактного стока:

$$q_k = a_k (S_1 + \xi_2 S_2 + \dots + \xi_i S_i + \xi_N S_N) = a_k S_p. \quad [3]$$

Здесь  $N$  - число предшествующих пику притока интервалов времени, на которые разбит период контактного добегаия;  $S_i$  - слой водообразования за  $i$ -ый интервал;  $\xi_i$  - соответствующий безразмерный коэффициент, который тем меньше, чем больше его индекс. Величина  $S_p$ , ниже именуемая расходоформирующим слоем, складывается из: 1) полного слоя за первый предшествующий интервал, отвечающий "быстрому" подповерхностному стоку с добегаием  $\tau_1$ , и 2) долей водообразования за ряд более удаленных интервалов времени, лежащих в диапазоне от  $\tau_1$  до максимального времени добегаия  $\tau_N$  в наименее проницаемых грунтах.

$$\text{Модуль поверхностного склонового стока} \quad q_n = a_n S_n^n \quad [4]$$

Здесь склоновый расходный коэффициент  $a_n = \frac{m\sqrt{i}}{l} \epsilon_0$ ;  $l$  - длина склона;  $i$  - его уклон;  $m$  - скоростной коэффициент;  $\epsilon_0$  - коэффициент временного задержания в прирусловых осыпях.

Суммируя (3) и (4), получаем модуль смешанного стока:

$$q_m = a_k [K_{cx} (S_1 - S_n) + \xi_2 S_2 + \dots + \xi_N S_N] + a_n S_n^n \quad [5]$$

Коэффициент "синхронности"  $K_{cx}$  введен для учета неодновременности максимумов поверхностного и быстрого контактного. Максимум последнего запаздывает относительно поверхностного на время вертикального промачивания до водоупора и на время между концом ливня и концом интервала  $\tau_1$ .

Поскольку непосредственные измерения склонового стока обычно отсутствуют, то параметры паводка определяются по данным русловой сети. Возможны два способа разработок: 1) ретрансформация русловых максимумов в склоновые, 2) решение обратных задач непосредственно по русловым максимумам.

Выражение русловых расходов [1] можно привести к виду:

$$q_p = \frac{\epsilon_p K_r K_F \gamma_p}{\tau_p} \quad [6]$$

Здесь  $Y_p$  - слой притока со склонов в интервале времени добегания  $\tau_p$ ;  $K_F$  - коэффициент редукции стока по площади;  $K_r$  - так называемый "гидрографический коэффициент":

$$K_r = \frac{\int q_{t-\tau} \frac{\partial f}{\partial \tau_p} d\tau_p}{B_{cp} \int q_{t-\tau_p} d\tau_p} \quad [7]$$

где  $B_{cp}$  - средняя ширина бассейна по изохронам.

При прогнозировании паводков учитывается конкретное распределение осадков по межизохронным полоскам, слагающим бассейн. Это позволяет положить  $K_F = 1$ . Дальнейшие преобразования приводят к выражению

$$q_p = E_p K_r S q_0 \quad [8]$$

Безразмерную величину  $S = \frac{T_0 \Psi}{(x+1)\tau_p}$  можно назвать нормальным коэффициентом русловой

трансформации, поскольку при  $E_p K_r = 1$  она преобразует максимальный модуль склонового притока  $q_0$  в максимальный русловой  $q_p$ ;  $T_0$  - продолжительность склонового притока;  $\Psi$  - коэффициент действующего слоя, равный отношению наибольшего притока за время добегания ко всему слою стока;  $x$  - показатель кривой редукции гидрографа притока. Подставляя в (8) значение  $q_0$  имеем:

$$q_p = A_k S_p + A_n S_n^n = A_k [K_{cx} (S_1 - S_n) + \xi_1 S_2 + \dots + \xi_N S_N] + A_n S_n^n \quad [9]$$

Здесь  $A_k, A_n$  - коэффициенты контактного и поверхностного модулей:

$$A_k = E_p K_{rk} S_k a_k \quad [10]$$

$$A_n = E_p K_{rn} S_n a_n \quad [11]$$

Индексы "К" или "П" относят расчетные компоненты приведенных формул к контактному (К) или поверхностному (П) стоку.

Как показывают данные, поверхностный сток образуется обычно только на открытых участках поверхности, а в лесу лишь с дорог, троп и участков, уплотненных выпасом. Эти участки в практических расчетах целесообразно относить к незалесенной площади. Однако, особо сильные ливни способны вызвать поверхностный сток и в лесу, как это было, например, в Межгорье 11.VIII 1964 г. Поэтому в общем случае формулу (9) следует переписать так:

$$q_p = A_k \left\{ (S_p - S_1) + K_{cx} [S_1 - (1-\gamma)S_n - S_{пл} \gamma] \right\} + A_n S_n^n (1-\gamma) + A_{пл} S_{пл}^n \gamma \quad [12]$$

Здесь  $S_{пл}$  - слой поверхностного водообразования в лесу;  $A_n, A_{пл}$  - расходные коэффициенты поверхностного стока в поле и в лесу;  $\gamma$  - относительная лесистость.

Формула [12] отвечает случаю, когда поверхностная составляющая больше контактной, которая учитывается членом с фигурными скобками. Если преобладает контактный модуль (бассейны с большой лесистостью), то следует положить  $K_{cx} = 1$ , а к поверхностной составляющей  $[A_n S_n^n (1-\gamma) + A_{пл} S_{пл}^n \gamma]$  ввести коэффициент синхронности поверхностного стока с контактным ( $K'_{cx}$ ).

Для решения обратных задач использована обширная информация по разнообразным по величине и характеру бассейнам. Первой задачей явилась разработка формулы расходоформирующего слоя контактного стока  $S_p$ , включая разбивку общего водообразования по  $N$  интервалам добегания и расчет параметров  $\xi$  выражения [3]. Для этого были отобраны паводки контактного происхождения, образованные неливневыми обильными дождями, распластанные, без острых пиков. Ин-

тервал  $\tau_1$  определялся как максимальное время, в котором существует линейная связь  $q = f(S_1)$ , где  $S_1$  и  $q$  - полное водообразование и модуль, отвечающие кратковременным дождям с продолжительностью  $T < \tau_1$ . Из этого условия, в увязке с данными натурных наблюдений, было получено  $\tau_1 = 3$  часа. Интервал  $\tau_2$  определялся по данным о паводках с продолжительностью водообразования от  $\tau_1$  до  $\tau_2$  - из условия линейности связи  $\Delta q = f(S_2)$ , где  $\Delta q$  - отклонение модуля от значения  $f(S_1)$  и т.д. Параметры  $\xi$  определялись по угловым коэффициентам указанных связей. Разработка контролировалась построением зависимости общего модуля от расходоформирующего слоя в ряде вариантов, различающихся по максимальному времени добега  $\tau_k$ , и способу его разбивки на интервалы. Время  $\tau_k$ , в увязке с данными опытов, получилось равным 3 суткам. Наилучшую тесноту связи  $q = f(S_p)$ , с учетом также и смешанных паводков, дала формула:

$$S_p = 0,5 S_3 + 0,2 S_{10} + 0,15 S_{24} + 0,05 S_{48} + 0,1 S_{72} \quad [13]$$

где  $S_i$  - суммарный слой водообразования на конец предшествующих расчетных периодов (0-3, 0-10, 0-24, и т.д.). Слой поверхностного водообразования определялся так:

$$S_n = X_n - h_{кр} T_{кр} \quad [14]$$

Здесь  $T_{кр}$  - продолжительность поверхностного водообразования, т.е. взятая в расчетном интервале  $T_n$  сумма отрезков времени, имевших интенсивность осадков больше минимальной стокообразующей "критической" ( $h_{кр}$ );  $X_n$  - слой осадков за время  $T_{кр}$ . Величину  $T_n$  следует определить как сумму времени стекания по склону, в осыпи и среднего времени руслового добега внутри расчетной площади или межизохронной полоски. В практических расчетах время выборки можно совместить с первым интервалом контактного добега  $\tau_1$ , положив  $T_n = \tau_1 = 3$  часа.

Величина  $h_{кр}$  отвечает моменту восполнения впитывающей способности и, следовательно может быть определена по кривым впитывания, помеченным индексом увлажнения  $I_w$ . Кривые поверхностного впитывания были построены в функции от накопленного за истекшее время слоя водообразования. Конечная ордината кривой ( $k_0 = h_{кр} \min$ ) была принята по данным экспериментов равной 0,04 мм/мин. Начальные ординаты, форма кривых принимались с учетом опытных данных и наблюдений, а затем корректировались по сходимости наблюдаемых и вычисленных поверхностных модулей. Полученное семейство кривых  $h_{кр} = f(I_w, S_m)$  рассматривается как территориально общее для Карпатского региона (открытые склоны) (рис.1). Критическая интенсивность для залесенных склонов принята приближенно постоянной и равной 2,2 мм/мин, но при условии, что ее продолжительность была не менее 3 мин при влажной и 4 мин при сухой почве.

Коэффициент синхронности контактного стока с поверхностным максимумом теоретически можно выразить так:

$$K_{сх} = \left( \frac{f_1}{\tau_1} + \frac{f_2}{\tau_2} + \dots + \frac{f_N}{\tau_N} \right) T_{кр} \quad [15]$$

Отсюда, отбрасывая малые слагаемые и имея ввиду (13), получим

$$K_{сх} = 0,217 T_{кр} \quad [16]$$

Коэффициент синхронности  $K'_{сх}$ , равный отношению одновременных ординат поверхностного спада и контактного пика, определяется по следующей таблице.

Время от начала спада	0	30 мин	45 мин	1-3 часа	более 3 часов
$K'_{сх}$	1,0	0,45	0,20	0,15	0,0

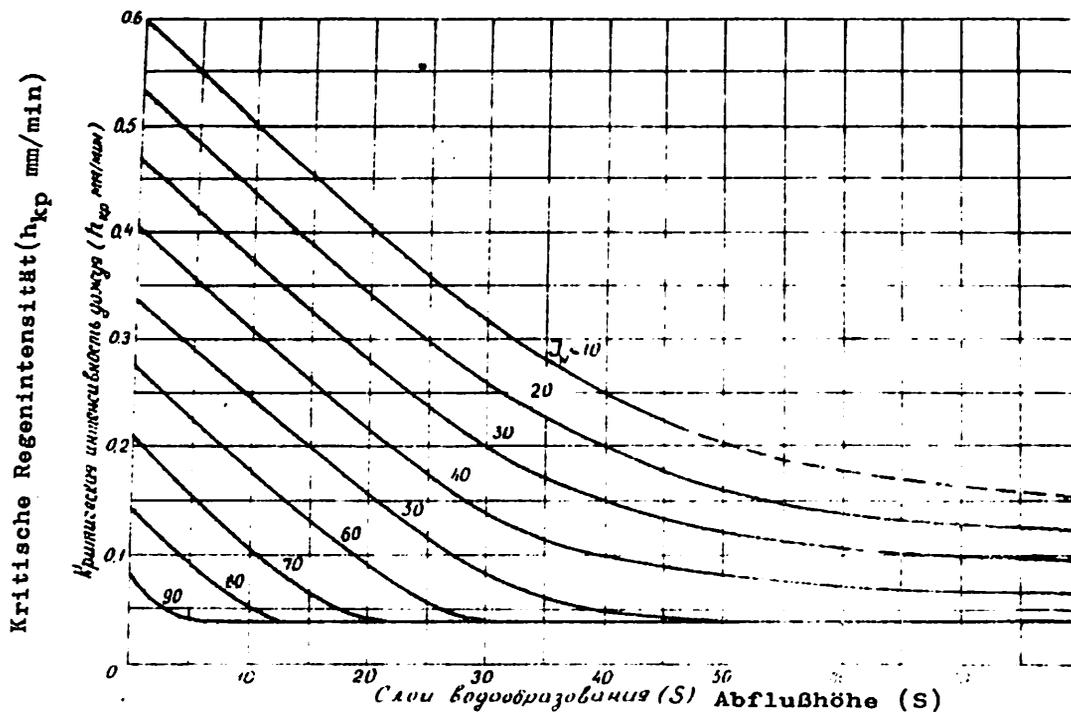


Рис.1 Зависимость критической интенсивности дождя от слоя водообразования (S) и индекса увлажнения ( $I_w$ ).

Коэффициент русло-пойменной трансформации  $S_k, S_n$  зависят от соотношения между русловым временем добега и продолжительностью склонового притока  $T_0$ . В горных условиях, при устойчивой и довольно большой величине  $T_0$  и малых значениях  $T_A \approx T_1$ , практически единственным переменным фактором трансформации оказывается время руслового добега. Коэффициенты  $K_{rp}$  и  $K_{rk}$  изменяются в узких пределах, почти не отличаясь от единицы. Таким образом, в первом приближении, из [10] и [11] следует  $\frac{A_n}{E_p} = f(\bar{\tau}_p)$  и  $\frac{A_k}{E_p} = \varphi(\tau_p)$ , где

среднее время добега на бассейне,  $E_p$  - коэффициент русло-пойменного водообмена, зависящий от отношения  $\frac{b_n}{\bar{b}_n}$  ( $b_n, \bar{b}_n$  - ширины поймы фактическая и вычисленная по корреляции с площадью бассейна). Для водосборов Карпат получено:

$$b_n = 1,6 F^{0,8} \quad \text{и} \quad E_p = 2(1 + 0,625 F^{-0,8})^{-1} \quad [18]$$

Бассейновые значения функции  $A_k$  определялись для паводков, заведомо контактного происхождения по связи  $q_k = f(S_p)$ . При использовании также и смешанных паводков эта функция вычислялась по нижней огибающей потока точек. Территориальное обобщение привело к линейной зависимости от времени добега:

$$A_k = 0,016 E_p (1 - 0,1 \bar{\tau}_p) \quad [19]$$

Бассейновые значения  $A_n$  и  $n$  определены по связи  $q_n = f(S_n)$ , где значения  $q_n$  вычислены по разности наблюдаемых и контактных максимумов. Территориальное обобщение дало формулу

$$A_n = 0,027 E_p (\bar{\tau}_p + 0,1)^{-1/3} \quad [20]$$

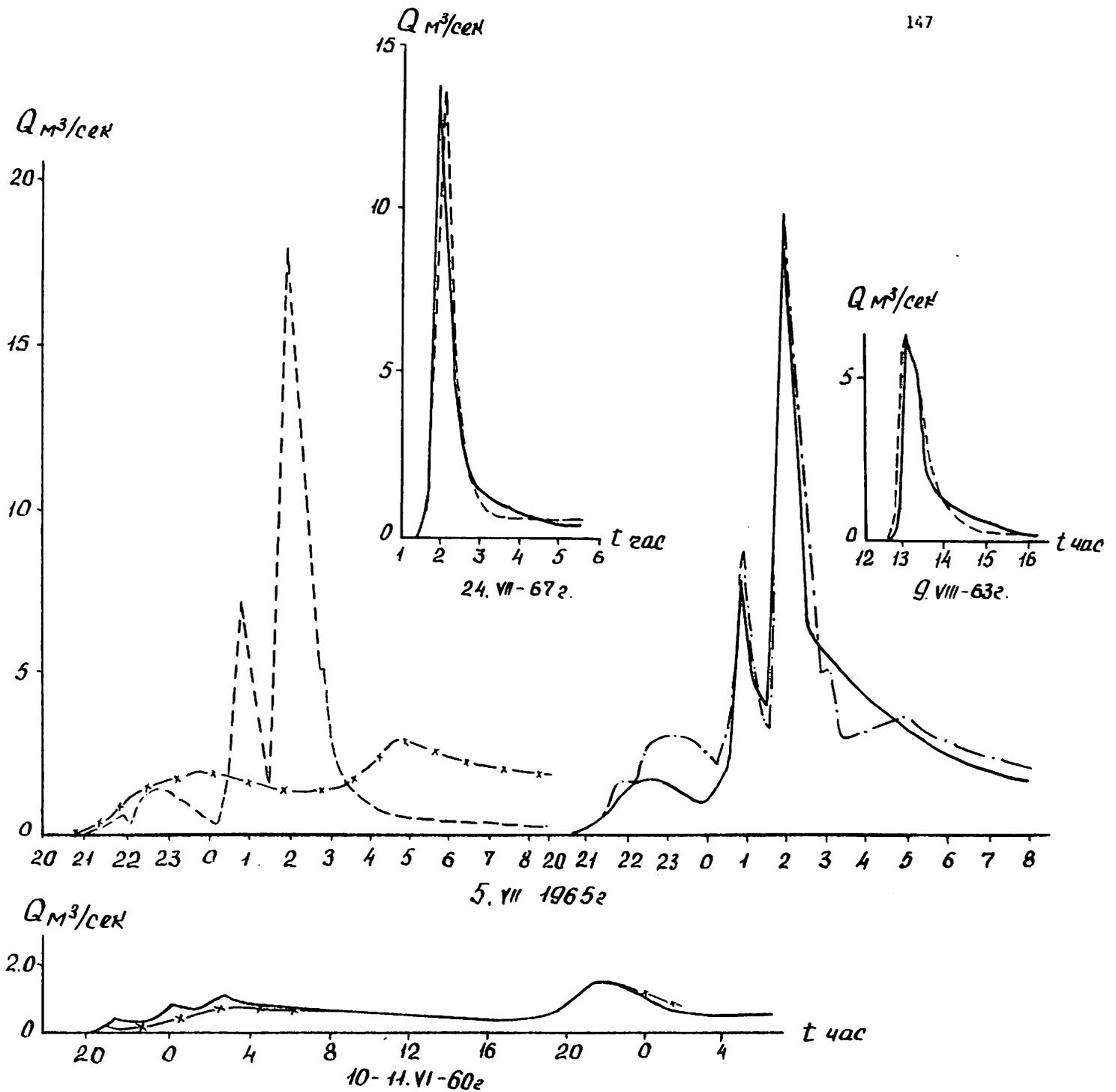


Рис. 2 Гидрографы стока разного генезиса  
(руч. Пилипец - Подобовец,  $F = 7,8 \text{ км}^2$ )  
— Наблюдаемый. Рассчитанные: --- суммарный,  
--- поверхностный, -x- контактный

Значение  $n$  получено равным  $3/2$  (как и по опытным данным).

Скоростные коэффициенты  $M$  определены по данным многочисленных опытов на больших дождевальных площадках и склоновых полосках (3). Из соотношения этих коэффициентов на открытых и лесных горных склонах получено  $A_{пл} = 0,67 A_{к}$ .

Проверка предложенной методики предвычисления максимальных расходов выполнена по материалам Закарпатской стоковой станции (свыше 500 наивысших расходов) и по данным о расходах рек Карпат в катастрофический паводок 1969 г. В качестве критерия точности принято отношение средней квадратической погрешности расчета к среднему квадратическому отклонению от среднего ( $\frac{S}{\bar{S}}$ ). Получены значения  $\frac{S}{\bar{S}}$  от 0,12 до 0,54 (для водотоков ЗСС). Для паводка 1969 г. средняя погрешность составила 12,7%.

Предвычисление гидрографа стока можно выполнить разными способами, основанными на вышеприведенных формулах. Так, имея ход водообразования по ряду пунктов, можно вычислить модули контактного и поверхностного притока на частных площадях или межизохронных полосках водосбора, положив в [19] и [20]  $\tau_p = 0$ . Синтезированный гидрограф получается затем по [1]. Вполне пригоден также упрощенный генетический способ расчета, основанный на определении ординат гидрографа за периоды подъема и пика по территориально общим формулам модулей контактного и поверхностного стока. Спадовая ветвь строится по типовым кривым. Слой стока на спаде вычисляется по разности известных слоев стока - общего и в фазе подъема. Продолжительность спада контактного и поверхностного стока вычисляется как сумма продолжительности склонового притока, руслового времени добега и завершающего времени истощения пойменных запасов. На рис.2 показаны наивысшие предвычисленные и наблюдаемые гидрографы разного генезиса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бефани Н.Ф. Территориально общие зависимости для прогнозирования паводочного стока рек Восточных Карпат. VI-я конференция придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Киев, Изд. Урожай, 1972.
2. Бефани Н.Ф. Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. Ленинград, Гидрометеониздат, 1965.
3. Бефани Н.Ф. О расчете основных характеристик дождевого стока и потерь на горных склонах. Труды ДВНИГМИ, 1967, вып. 24.

ПРОГНОЗ ПАВОДКА НА РЕКАХ С ТАЛО-ДОЖДЕВЫМ ПИТАНИЕМ

Н.Т.Джорджевич

VORHERSAGE VON HOCHWÄSSERN, DIE DURCH REGEN UND GLEICH-  
ZEITIGE SCHNEESCHMELZE VERURSACHT WERDEN

N.T.Džordžević

Резюме

При использовании уравнения теплового баланса для расчета таяния снега серьезным затруднением является большая изменчивость элементов радиационного теплообмена, температуры и влажности воздуха, ветра и других метеорологических элементов, как по горизонтальному расстоянию, так и по высоте. Преимущество метода в том, что почти все элементы входят в расчет, что дает возможность изучать процессы достаточно детально.

Наиболее приемлемым способом расчета таяния в оперативной работе являются расчет по положительной температуре воздуха. Наблюдение над температурой воздуха проводится в большом числе пунктов, что облегчает его интерполяцию по территории, кроме того температуру воздуха можно предсказать с большей точностью, чем другие элементы радиационного и метеорологического режима.

Изложенный метод расчета гидрографа талодождя требует дальнейшей разработки такой модели. Необходима дальнейшая проверка на основании более полных и точных наблюдений над снежным покровом и осадками.

Zusammenfassung

Ernste Schwierigkeiten bereiten bei der Anwendung der Gleichung der Wärmebilanz für die Berechnung der Schneeschmelze die große Veränderlichkeit des Strahlungswärmeaustausches, der Temperatur und der Feuchtigkeit der Luft, des Windes und anderer meteorologischer Elemente, und zwar in horizontaler Entfernung als auch der Höhe nach. Der Vorzug der vorgeschlagenen Methode besteht darin, daß fast alle Elemente in die Rechnung eingehen, was die Möglichkeit gibt, die Prozesse genügend detailliert zu untersuchen.

Die annehmbarste Art der Berechnung der Schneeschmelze in der operativen Arbeit ist die Berechnung nach der positiven Lufttemperatur. Die Beobachtung der Lufttemperatur wird an einer großen Anzahl von Punkten durchgeführt, was ihre Interpolation auf dem Gebiet erleichtert, außerdem kann man die Lufttemperatur mit größerer Genauigkeit voraussagen als die anderen Elemente des Strahlungs- und meteorologischen Regimes.

Die dargelegte Methode der Berechnung der Abflußganglinie für Tau- und Regenabfluß erfordert eine weitere Bearbeitung eines solchen Modells. Notwendig ist eine weitere Prüfung auf der Grundlage von vollständigen und genaueren Beobachtungen der Schneedecke und der Niederschläge.

Прогноз паводка на реках с тало-дождевым питанием

Режим рек в горной части Западной Моравы, в зимневесенний период характеризуется частыми паводками наблюдаемыми в результате обильных дождей с одновременным снеготаянием в период зимних оттепелей.

Для анализа формирования паводков смешанного питания с целью их расчета и прогноза, необходимо в первую очередь правильно учитывать отдельные составляющие питания. Выделенные тало-дождевого питания для полугорных рек, где дождевой сток накладывается на переменный во временной сток талых вод, представляет собой довольно трудную задачу.

В данной работе внимание уделено в основном изучению режима снежного покрова, процессов таяния и выяснения долевого участия талой и дождевой воды, в формировании максимальных расходов смешанных паводков.

На исследуемой территории снег выпадает и тает частично или полностью несколько раз за зиму, при этом во время оттепелей обычно выпадают осадки. В таких случаях приобретает равнозначный интерес определения количества как стаявшего снега, так и жидких осадков в течение зимне-весеннего периода.

Для исследований был выбран бассейн реки Моравицы, правого притока реки Западной Моравы. Площадь бассейна равна  $832 \text{ км}^2$ . Средний уклон составляет  $1,17\%$ . Благодаря такому уклону стекание по бассейну происходит очень быстро. Максимальные расходы не превышали  $461 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Закономерности во времени прохождения паводков смешанного и дождевого питания не наблюдается. В зимне-весенний период паводки проходят друг за другом, часто накладываясь один на другой. Резкие подъемы расходов воды в период снеготаяния, наступают благодаря выпадению значительных осадков. В периоды только оттепелей условия снеготаяния обуславливают сравнительно плавный характер изменения расходов воды.

Для гидрологических прогнозов важно знать в зимне-весеннем периоде снегозапасы в бассейне перед началом таяния, а также интенсивность таяния, т.е. количество стаявшего снега выраженное в виде высоты слоя воды в миллиметрах.

В настоящей работе рассматривается уравнение теплового баланса снежного покрова в период таяния и возможность его использования для расчета снеготаяния. Указанные расчеты необходимы для прогнозов изменения стока в период паводка.

#### Снеготаяние и способы его расчета

Интенсивность таяния снега можно определить в современных условиях тремя путями: по методу теплового баланса П.П.Кузьмина, по формуле Е.Г.Попова и по температуре воздуха.

Наиболее простой и доступный метод расчета интенсивности снеготаяния по температуре воздуха, основанный на эмпирической зависимости между количеством стаявшего снега и положительной температурой воздуха.

Вычисление интенсивности таяния снега по формулам Е.Г.Попова основано также на решении уравнения теплового баланса снежного покрова, с помощью некоторых эмпирических зависимостей, в основу которых положен суточный ход температуры воздуха.

С целью установления наиболее приемлемого и точного метода расчета, произвели расчеты интенсивности снеготаяния уравнением теплового баланса и сравнили с расчетной величиной интенсивности снеготаяния по методу Е.Г.Попова и по температуре воздуха.

#### Расчет интенсивности снеготаяния по методу теплового баланса

Для определения интенсивности снеготаяния пользовались упрощенной расчетной схемой П.П. Кузьмина, согласно которой интенсивность снеготаяния определяли по материалам наблюдений метеорологических элементов - температуры и влажности воздуха, температуры поверхности снега, скорости ветра, наблюдений над солнечной радиацией, излучением и альбедо снега.

Точность расчета интенсивности снеготаяния зависит лишь от точности вычисления отдельных слагаемых теплового баланса.

Источниками поступления тепла к снежному покрову является:

- а) лучистая энергия солнца (прямая и рассеянная радиация)
- б) длиноволновая радиация атмосферы и облаков
- в) температура воздуха
- г) скрытая теплота испарения, получаемая снегом при конденсации водяных паров
- д) тепло от жидких осадков, выпадающих на поверхность снега.

Количество тепла получаемое снегом под точ. г) и д) невелико, поэтому при выводе расчетных формул снеготаяния оно обычно не учитывается. Процесс прогревания снега в котором большая роль принадлежит водяным парам, происходит быстро при малой затрате тепла, благодаря малой теплоемкости снега.

Как показывают расчеты П.П.Кузьмина для нагревания на  $1^{\circ}$ , 10-ти сантиметрового слоя снега при плотности 0,25 требуется всего лишь 1,2 кал.

Количество тепла получаемое снегом от выпадающих осадков невелико по сравнению с другими составляющими баланса, поэтому при выводе расчетной формулы снеготаяния, оно обычно не учитывается. Также тепло-обмен между снежным покровом и почвой ввиду его незначительности во внимание не принимается. Исследования (Кузьмина) показали, что тепло-обмен с почвой в любых условиях не превышает  $\pm 10$  кал/см<sup>2</sup> в сутки, что составляет не более 2-3% прихода тепла от радиации.

Рассмотрим составляющие теплового баланса в отдельности, при этом за единицу времени примем сутки.

Уравнение теплового баланса тающего снега для данной площади и промежутка времени имеет вид:

$$W = W_p + W_k + W_u$$

$W_p$  = Радиационный баланс горизонтальной поверхности снежного покрова выражается

$$W_p = (Q + q) (1 - r) - R \text{ кал/см}^2 \text{ сутки}$$

$(Q + q)$  - суммарная радиация (прямая плюс рассеяная)

$r$  - альbedo снега

$R$  - эффективное излучение (разность между длиноволновым излучением поверхности снега и обратным излучением атмосферы).

Солнечная радиация зависит от альbedo снега ( $r$ ).

Величина последнего зависит от структуры снега.

Свежевыпавший снег обладает наибольшей отражательной способностью снега, около 0,85. По мере его уплотнения альbedo уменьшается и к максимуму начала таяния приближается к 0,60 - 0,65.

$W_k$  - турбулентный теплообмен не может быть непосредственно измерен с помощью приборов и должен исчисляться теоретическим путем. Поток тепла к снегу или наоборот зависят от температуры воздуха ( $t$ ), температуры поверхности снега ( $t_p$ ), которая во время таяния не превышает  $0^{\circ}$ , и от скорости ветра ( $u$ ) т.е.

$$W_k = (a + bu) (t - t_p) \text{ кал/см}^2, \text{ а и в эмпирические коэффициенты.}$$

$W_u$  = Поток тепла от испарения и конденсации зависит от влажности воздуха в приземном слое, от турбулентности воздуха. Доступным способом расчета являются эмпирические формулы, где входные элементы скорость ветра ( $u$ ), влажность воздуха на 2 метра ( $e$ ) и при температуре снега  $0^{\circ}$  - ( $e_p$ )

$$W_u = (a + bu) (e - e_p) \text{ кал/см}^2.$$

### Расчет интенсивности снеготаяния в бассейне реки Моравицы

Исследования, расчеты таяния и средневзвешенных осадков по площади водосбора были выполнены за 1960 - 1970 г. по десяти станциям, расположенным довольно равномерно по бассейну. На 4 станциях ведутся ежедневные наблюдения у осадков, температуры воздуха, снежного покрова, скорости ветра, облачности, упругости водяного пара. На станции Златибор ведутся ежедневные наблюдения суммарной, прямой и рассеянной радиаций с 1964 года.

Применяя уравнения теплового баланса, рассчитывают суточную интенсивность снеготаяния по выше указанным данным метеорологических и актинометрических наблюдений.

Рабочую схему расчета снеготаяния можно представить в виде:

$$m_c = m(Q + q) + m_{R0} + \Delta + m_a$$

$m_c$  - слой талой воды за сутки.

Составляющая  $m(Q + q)$  обусловленная поступлением в снег тепла суммарной солнечной радиации, имеет положительный знак и выражается:

$$m(Q + q) = 0,125 (Q + q)(1 - r)(1 - 0,20 N_0 - 0,47 N_H)$$

$(Q + q)$  - рассчитывается непосредственно по данным наблюдений над радиацией.

$r$  - альbedo снега рассчитано приблизительно по убыли высоты снега  $h$  и его начальной высоте  $h_H$  перед оттепелью (рис.1)

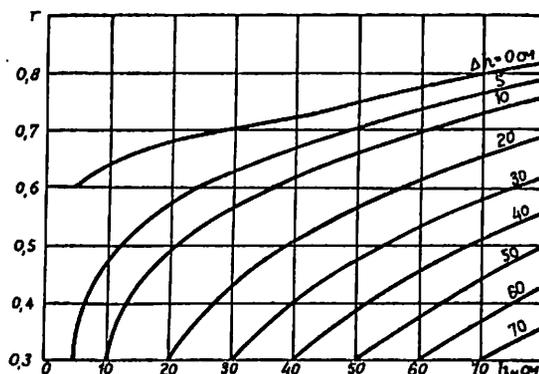


Рис.1. Альbedo снега  $r$  в зависимости от высоты снега перед началом таяния  $h_H$  и убыли высоты снега за время оттепели  $\Delta h$ .

$N_0$   $N_H$  - рассчитано непосредственно по данным наблюдений над общей и нижней облачностью.

Составляющая  $m_R = m_{R0} + \Delta$  обусловлена теплоотдачей снежного покрова эффективного излучения. В случае сплошной облачности и глубокой инверсии  $m_R$  имеет небольшие положительные значения. Расчеты производятся для тающего снега, чья тающая температура поверхности равна  $0^\circ$ . При температуре меньше  $0^\circ$  вводится поправка на температуру  $\Delta$ , которая имеет положительный знак.

$$m_{Ro} = -180 \epsilon \sigma 274^4 + 180(0,62 + 0,05 \sqrt{e}) (1 + 0,12 N_o + 0,12 N_H) \epsilon \sigma T_a^4$$

Составляющая снеготаяния  $m_a$  может иметь как положительный так и отрицательный знак, обусловленная турбулентным теплообменом с атмосферой и скрытой теплотой конденсации и испарения и выражается

$$m_a = a_c \quad \gamma u$$

$u$  = скорость ветра на высоте флюгера

$\gamma$  = скрытая теплота конденсации и испарения выражается

$$\gamma = (t_{200} - t_p) + 1,75(e_{200} - e_p)$$

$t_{200}$  = температура воздуха на 2 метра

$t_p$  = температура поверхности снега

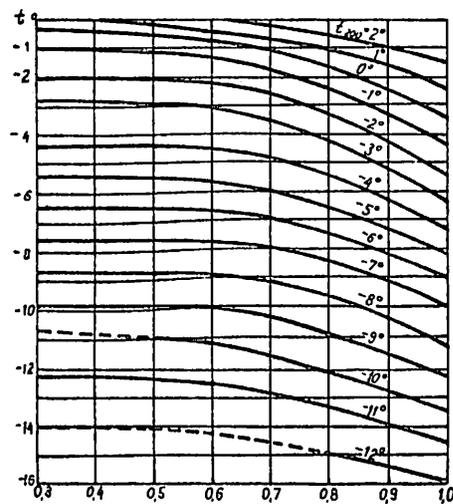
$e_{200}$  = упругость водяного пара на 2 метра

$e_p$  = упругость водяного пара на поверхности снега

Вотсутствии наблюдения,  $t_p$  определяли с помощью графика (рис.2) когда  $-t_{200} < 3^{\circ}$ ; в случаях когда  $t_{200} > 3^{\circ}$  то  $t_p$  принимали равной  $0^{\circ}$ .

$a_c$  - находим из выражения

$$a_c = 0,878 \frac{1 + 0,547 u}{u} \quad \text{мм/сутки}^{-1}$$



$$(1 - 0,2N_o - 0,47N_H)$$

Рис.2. График зависимости между среднесуточными величинами  $t_p$ ,  $t_{200}$  и  $(1 - 0,2N_o - 0,47 N_H)$

В работе пользовались параметрами рассчитанными П.П.Кузьминым, которые по автору применимы в диапазоне широт от  $45 - 65^{\circ}$ .

При расчете слоя талой воды за начало таяния брали первый день положительной средне-

суточной температуры воздуха, а за окончание - день когда местность остается покрыта снегом больше 10 см.

Средняя температура воздуха, упругость водяного пара, скорость ветра, суммарная радиация, облачность вычислялись как среднее из наблюдений 7, 13, 19 и 01 час.

В приложении 1, дан пример расчета суточных сумм снеготаяния для бассейна реки Моравицы у замыкающего створа Арналье методом теплового баланса.

## ПРИМЕР РАСЧЕТА СУТОЧНЫХ СУММ СНЕГОТАЯНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

АРНАЛЬЕ 1964 год

ДАТА	$(Q'+Q)_0$	$r$	$1-0.80H_0-0.41H_0$	$M(Q'+Q)$ [м.б.]	$E_{200 \text{ см}}$	за сутки [24°]		$H_0+H_H$	$t_{200 \text{ см}}$	$M_{\text{та}}$	$t_H$	$\Delta$	$E_n$ [м.б.]	$(t_{\text{возд}}-t_H)$	$(E_{\text{возд}}-E_n)$	$\gamma$	$U_{\text{ср}}$ (м/с)	$M_a$	$M_c$ [мм]
						$N_0$	$N_H$												
15. II	273	0.71	0.68	7.0	4.8	0.93	0.27	120	0.2	-13.2	-1.0	1.1	4.3	1.2	0.5	3.0	3.0	7.0	1.9
16. II	279	0.65	0.82	10.0	5.6	0.50	0.17	0.67	1.8	-15.0	-0.8	1.1	5.3	2.6	0.3	3.9	5.0	14.9	10.1
17. II	231	0.57	0.65	5.6	5.9	0.53	0.50	103	3.8	-9.8	0.0	0.0	5.9	3.8	0.0	3.8	12.0	25.0	20.8
18. II	193	0.53	0.54	6.0	7.2	0.93	0.60	153	4.2	-3.9	0.0	0.0	6.3	4.2	0.9	6.0	9.5	32.0	34.1
19. II	200	0.49	0.58	5.4	7.2	0.97	0.50	147	5.0	-3.5	0.0	0.0	6.7	5.0	0.5	6.0	6.5	25.0	28.9

ПРИМЕЧАНИЕ: облачности выражаются в долях единицы

Проверка проводилась путем сравнения результатов расчета с фактическим стаянием снега. При этом сравнение производили не с величиной суточного стаяния, так как ошибка измерения стаяния снега может быть соизмеримой с величиной суточного стаяния, а для интервалов не менее пентады (продолжительности таяния).

В расчетах, ошибки при определении снеготаяния были в связи с недостаточной точностью определения исходных данных расчета - скорости ветра, температуры и влажности воздуха, облачности и других элементов.

Расчитанные значения интенсивности снеготаяния методом теплового баланса по П.П.Кузьмину сопоставлены с расчетным слоем талой воды по данным только одной температуры воздуха и по формуле Е.Г.Попова, приведены в приложении 2.

Из данных таблицы видно, что значения интенсивности снеготаяния, расчитанные по методу теплового баланса ниже этих же величин, вычисленных по температуре воздуха и по Е.Г.Попову, но в отношении фактически стаявшего снега самые приближенные. В таблице величина убили снеготаяния расчитана как разность между максимальными запасами воды в снеге перед таянием и остаточным запасом ее в момент когда высота снега не выше 5 см., с учетом выпадающих осадков в этом периоде.

Приложение 2

**РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ  
СНЕГОТАЯНИЯ В мм**

Дата	По бендероуэров воздуха	По формуле Е.Г. ПОПОВА	По нейтону теплого баланса	Убыль снеготаяния от начала снеготаяния до конца снеготаяния [мм]
15 II 1964	2.6	—	1.9	
16 II -"-	13.6	13.6	10.1	
17 II -"-	28.5	27.4	20.8	
18 II -"-	32.8	30.5	34.1	
19 II -"-	35.6	33.8	28.9	
Сумма слоев талой воды за период оттепели	113.1	105.3	95.8	98.9

Используя полученные таким путем величины стаявания снега можно далее получить подачу талой воды на бассейне за расчетный интервал времени. Для этого из величин стаявания нужно вычесть то количество воды, которое удерживается снегом в зоне одновременного таяния. Последнее зависит от водоудерживающей способности снега. Величина водоудерживающей способности снега сильно варьирует в зависимости от структуры и плотности снега. Для прогнозных расчетов принято значение  $\alpha = 30\%$ , т.е. значение интенсивности снеготаяния уменьшается на водоудерживающую способность снега.

На основании рассчитанной подачи талой и дождевой воды, рассчитан гидрограф талого дождевого стока.

Прогноз смешанного стока за паводочные периоды

При анализе гидрографа стока установлено, что метод коаксиальной графической корреляции применим не только к прогнозу объема дождевых паводков, но и к периодам смешанного снего-дождевого питания, если располагаем следующими данными:

- а) снеготаянием в бассейне
- б) слоем талой воды, аналогичной осадкам за расчетным интервалом времени и
- в) количеством жидких осадков выпавших в период формирования паводка.

Расчет гидрографа тало-дождевого стока

Модель прогноза паводка для реки Моравицы основан главным образом на использовании коррелятивных зависимостей величин прогнозируемого элемента от влияющих на него факторов.

На основании полученных данных о 80-ти дождевых паводках в бассейне Моравицы у Арилья и вычисленных осадках по материалам наблюдений осадкомерам, составлена таблица, которая содержит 5 параметров влияющих на формирование паводка, осадки и прибавленный к ним расчетный слой талой воды, коэффициенты влажности почвы, продолжительность дождя, стока, - которые взаимосвязаны.

Анализ взаимных отношений этих параметров сделан методом коаксиальной графической корреляции, чьи результаты приведены на рис. 3, форма графиков зависит от характера речного бассейна.

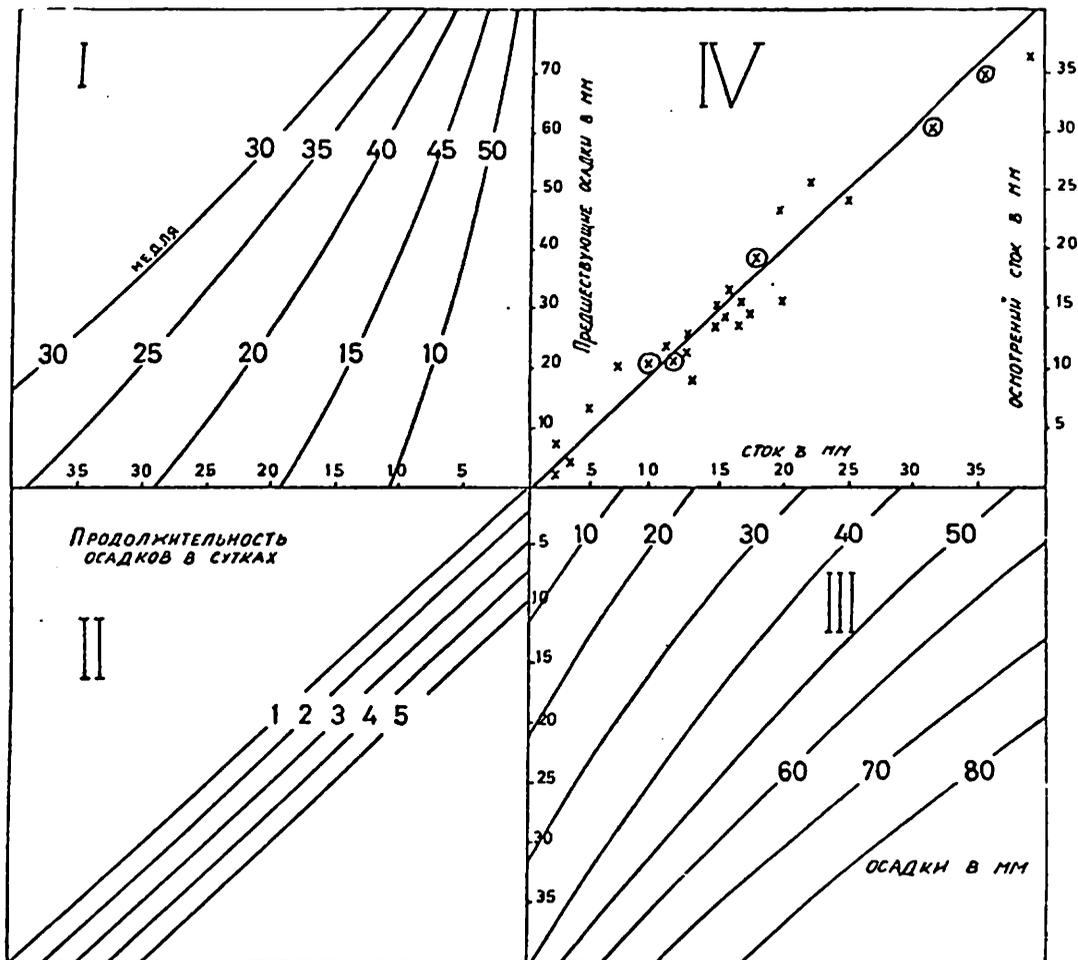


Рис. 3. Коаксиальная зависимость для определения паводочного стока полученная по данным р. Моравицы у замыкающего створа Арилье

В зимне-весенний период, который характеризуется паводками наблюдаемыми в результате обильных дождей с одновременным снеготаянием, приобретает равнозначный интерес определения количества стаявшего снега, так и жидких осадков. Величина поступления воды на поверхность бассейна равна сумме поступленных талых и дождевых вод. Значение этих величин вычисляются как среднее всей рассматриваемой площади.

Предсказания объема стока основывается на полном использовании фактических данных о снегозапасах и осадках.

Точки около линии равенства говорят, что установлена довольно тесная зависимость фактического и вычисленного стока, (в четвертом квадранте заокруженные точки обозначают паводки смешанного питания).

Распределение стока во времени решали методом единичного гидрографа, который нашел широкое применение в гидрологии, в частности, в расчетах гидрографа паводка.

Вычисленные ординаты среднего единичного гидрографа имеют следующие значения:  
 24, 40, 25, 16 м<sup>3</sup>/сек<sup>-1</sup>.

Распределение единичного паводка дано в расходах воды которое образуется от слоя стока 1мм.

Сумма ординат среднего единичного гидрографа 105 м<sup>3</sup>/сек<sup>-1</sup>. Для определения точности этого способа гидрографы, по методу единичного паводка, сопоставлены с фактическими гидрографами. На рис.4 представлено сопоставление фактических и вычисленных гидрографов для реки Моравицы у створа Арилье.

В восьмидесяти процентах результаты удовлетворительны.

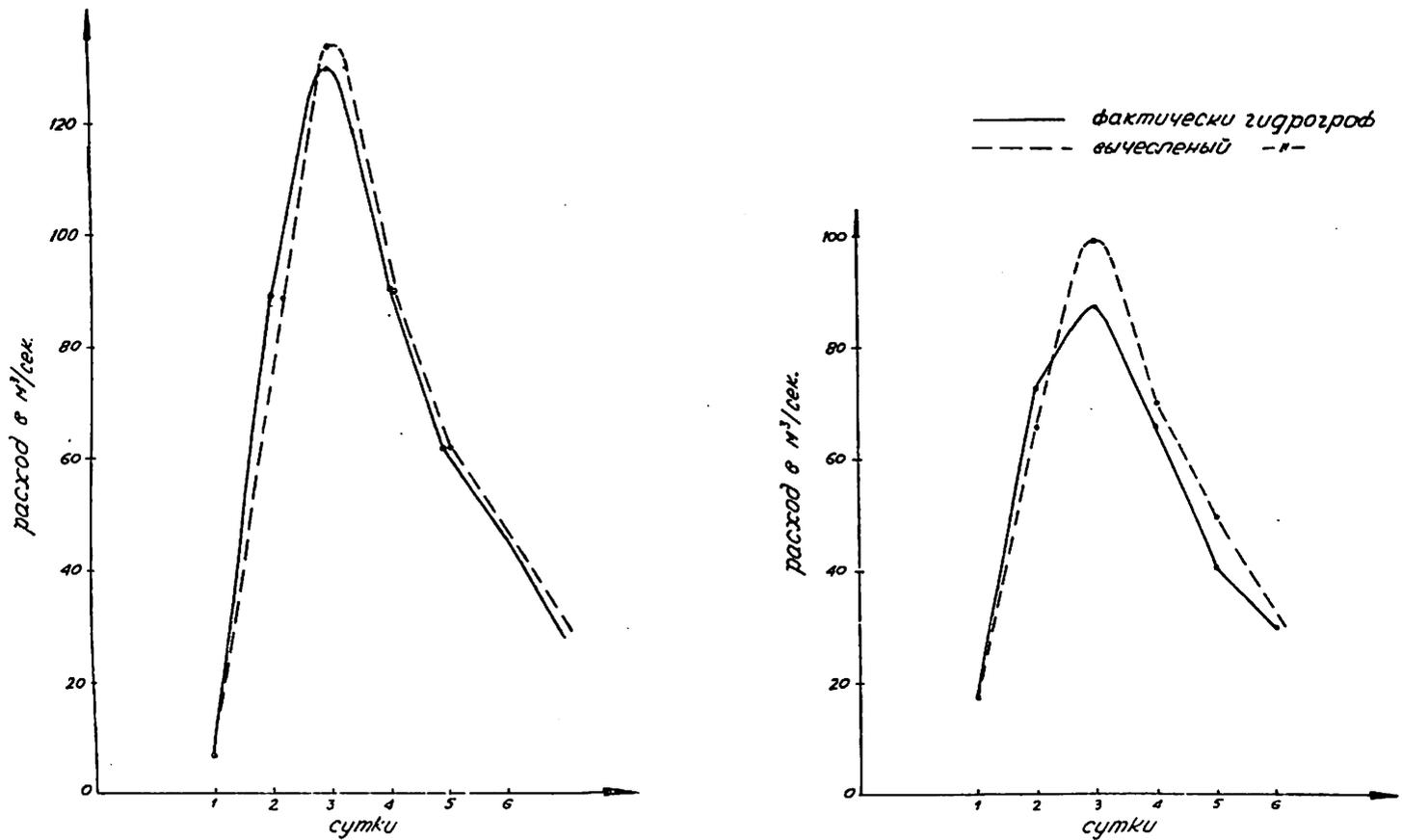


Рис.4. Сопоставление фактических гидрографа стока и вычисленных данных методом единичного гидрографа для р.Моравицы у Арилья

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Комаров В.Д. Весенний сток равнинных рек Европейской части СССР - условия формирования и методы прогнозов. 1960 г.
2. Кузьмин П.П. Исследование и расчет снеготаяния. Труды Г.Г.И., вып.7 (61)
3. Онуфриенко Л.Г. Интенсивность снеготаяния и водоотдача из снега. Труды Укр.НГМИ, вып.19
4. Важнов А.Н. Анализ и прогноз рек Кавказа. 1966
5. Комаров В.Д. Вопросы теории и расчета прогноза снегового половодья небольших равнинных рек. Труды Ц.И.П. вып.50
6. Ващнов А.Н. Прогноз стока половодья на горных реках с талодождевым питанием. Труды Ц.И.П. вып.59
7. Дмитриева А.Г. Прогноз стока горных рек. Труды Ц.И.П. вып.59
8. Огиевская В.А. К вопросу о питании рек Закарпатской области в зимне-весенний период.
9. Попов Е.Г. Основы гидрологических прогнозов. 1968 г.
10. Linsley R.K., Kohler M.A., Paulhus M. Applied Hidrolog. N.J. 1949 god.
11. Sherman L.K. Stream from rainfall by unit graph method Engineering N.J. Vob 108
12. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. 1961 г.

## 2. D I S K U S S I O N

### Draxler:

Zum Vortrag von Herrn Martinka über das kinematische Flußmodell möchte ich folgendes fragen:

1. Welche Datenbestände wurden in das mathematische Flußmodell gegeben?
  - 1a) Abstände/Zahl der Flußprofile
  - 1b) Rechenzeitschritt
  - 1c) Rechenzeitverhältnis zur Naturlaufzeit
2. In welchen Zeitabständen werden jeweils neue Prognosen erstellt?

### Martinka:

Zu 1.: Das Flußbett haben wir nach Möglichkeit gleichmäßig in 26 einzelne Abschnitte eingeteilt, da die große Differenz zwischen den einzelnen  $\Delta x$  die Notwendigkeit der Schrittwahl nach der  $\Delta t$ , die dem kürzesten  $\Delta x$  entspricht, hervorruft. Unter Beachtung der Bedingung von Kurakt-Friedrich-Lewi und dessen, worüber ich sprach, haben wir das Minimum  $\Delta x$  so festgesetzt, daß eine zahlenmäßige Stabilität der Entscheidung bei dem ausgewählten Zeitschritt  $\Delta t = 450$  S gefunden werden konnte, und in diesem Fall liegt die Schrittlänge  $\Delta x$  in den Grenzen von 1 000 - 4 000 Metern. Der Rechenintervallschritt beträgt 2 Stunden.

Zu 2.: Die Prognose wird in einem Intervall von 24 Stunden ausgearbeitet.

### Thiess:

Ich möchte Herrn Kirnbauer folgendes fragen:

1. Das Kalinin-Miljukow-Verfahren ist doch nur bei flachen Flüssen anwendbar, bei denen sich eine Hysteresen-Kurve ausbilden kann und das System homogen ist?
2. Dies ist bei dem Modell in Österreich nicht der Fall, folglich ist das Nash-Modell nicht anwendbar. Besser wäre das Dooge- oder das Lauterbach/Glaß-Stufenmodell gewesen.
3. Sodann möchte ich grundsätzlich noch alle Wissenschaftlern, die Parameter ausarbeiten, daran erinnern, daß diese Parameter alle Zufallsgrößen sind und als solche betrachtet und weiterverarbeitet werden müssen. Wenn Sie also für eine Flußstrecke operative Parameter erarbeitet haben, so steht keineswegs fest, daß diese auch konstant sind. Man muß sehr viele Berechnungen durchführen und die einzelnen Parameterwerte korrelieren mit den Eigenheiten und momentanen Gegebenheiten des Systems und sie dann nach den Regeln der mathematischen Statistik aufarbeiten. Erst dann können meines Erachtens erfolgreiche Hochwasservorhersagen betrieben werden.

### Kirnbauer:

Zu den Fragen 1 und 2 von Herrn Thiess wäre folgendes zu bemerken. Die Anwendung einer Systemkontrollfunktion muß grundsätzlich möglich sein. Ob sie sinnvoll praktisch angewendet werden kann, darüber entscheidet die Qualität der Ergebnisse.

Das Verfahren ist grundsätzlich - mit gewissen Einschränkungen - anwendbar. Man muß jedoch anmerken, daß kein mathematisches Verfahren ganz ohne Einschränkung zur Beschreibung des Naturvorganges "Abfluß" geeignet ist.

Die Strecke Ybbs-Wien wurde der Topographie entsprechend in zwei verschiedenen, getrennten Berechnungsschritten behandelt. Zur 3. Anmerkung von Herrn Thiess kann ich sagen, der Zufallscharakter der Parameter hat sich erwartungsgemäß gezeigt. Die Arbeit war als Versuch gedacht, den Einfluß der Variabilität der Parameter auf die Güte der Ergebnisse zu prüfen.

Kunsch:

1. Auf welche Weise wird der Einfluß des Seitenzuflusses auf den Flußteil Ybbs-Wien berücksichtigt?
2. Welcher Unterschied in den Prognose-Ergebnissen besteht zwischen dem Modell, um das es sich hier handelt, und derjenigen Vorhersage, die der Hydrographische Dienst gegenwärtig gebraucht?

Kirnbauer:

Zu der 1. Frage wäre zu bemerken, es war die Absicht der Arbeit einzelne Modellbausteine eines größeren Modells zu testen. Deshalb wurde vorläufig nur das Kalinin-Miljukow-Verfahren untersucht. Wäre es möglich, mit einer geringeren Zahl von Modellbausteinen auszukommen, also etwa durch Verzicht auf zusätzliche Beobachtungen an Zubringern, so wäre damit das Modell in seiner Anwendung billiger.

Es hat sich gezeigt, daß in vielen Fällen auf die zusätzliche Information durch Zubringer nicht verzichtet werden kann.

Zu der 2. Frage ist zu sagen, daß wegen der zuvor genannten speziellen Problemstellung ein Vergleich mit derzeit verwendeten Methoden nicht durchgeführt wurde.

Anderl:

Im Beitrag von Herrn Sosedko wird davon gesprochen, daß praktisch die gleiche Vorhersagezeit entsteht, gleich ob man nun vom gemessenen Niederschlag oder vom gemessenen Abfluß eine Vorhersage macht. Ich möchte dazu bemerken, daß nach unseren Erfahrungen die Vorhersagezeit vom Niederschlag bis zum Abfluß in kleinen Teileinzugsgebieten, welche mit einer Abflußmeßstelle ausgerüstet werden können, etwa 3 - 10 Stunden beträgt je nach der Art des Einzugsgebietes. Wenn man nun bei nicht allzu großen Einzugsgebieten eine Gesamtvorhersagezeit von etwa 20 Stunden hat, dann spielt diese Zeitdifferenz sehr wohl eine Rolle; bei großen Einzugsgebieten spielt sie keine Rolle.

Sidorowa:

Das vorgeschlagene System der Vorausberechnung des Verlaufs des Regenabflusses beruht auf der Auswertung der Daten über den Wasserdurchfluß (Wasserstand) bei kleinen Flüssen in großen Einzugsgebieten (Dnestr). Für dieses Einzugsgebiet gibt die Statistik der Daten über die tatsächlichen Niederschläge praktisch keine verlängerten Vorhersagefristen. Für die kleinen Einzugsgebiete ist jedoch die Statistik der Niederschläge zur Verlängerung der Vorhersagefrist unbedingt notwendig.

## 2. Д И С К У С С И Я

### Дракслер:

К докладу господина Мартинки о кинематической речной модели я хочу спросить следующее:

1. Какие данные были введены в математическую модель реки?
  - а) расстояние/число речных профилей;
  - б) шаг расчетных интервалов
  - в) отношение расчетного времени к естественному времени течения
  
2. В каких промежутках времени разрабатываются новые прогнозы?

### Мартинка:

1. Русло реки мы по возможности разделили равномерно на 26 отдельных участков, так как большая разница между отдельными  $\Delta x$  вызывает необходимость выбора шага по времени  $\Delta t$  соответствующего самому короткому  $\Delta x$ . Соблюдая условие Куракта-Фридрих-Леви и то, о чем я говорил, мы установили минимум  $\Delta x$  так, чтобы могла быть найдена числовая стабильность решения при выбранном шаге времени  $\Delta t = 450 \text{ S}$  и в этом случае длина шага  $\Delta x$  находится в пределах 1 000 - 4 000 метров. Шагом расчетных интервалов являются 2 часа.
  
2. Прогноз разрабатывается в интервале 24-х часов.

### Тисс:

Я хотел бы спросить у господина Кирибауэра следующее:

1. Способ Калинина-Милюкова применим ведь лишь для мелководных течений, у которых образуются гистерезисные кривые и для которых система гомогенна?
  
2. Это не имеет место для модели в Австрии, вследствие этого модель Наша неприменима. Вероятно, лучшими были бы ступенчатые модели Дуджа или Лаутербаха/Гласса.
  
3. Теперь я еще хочу принципиально напомнить всех ученых, разрабатывающих параметры, о том, что все эти параметры являются случайными величинами и как таковые они должны рассматриваться и обрабатываться. Если вы, значит, разработали для определенного участка реки оперативные параметры, то ни в коем случае не следует считать, что они являются также и константными. Необходимо проводить множество расчетов и скорелировать отдельные значения параметров с особенностями и моментальными условиями системы, и после этого их обработать в соответствии с правилами математической статистики. Лишь тогда можно проводить, по моему мнению, успешные прогнозы паводков.

### Кирибауэр:

По поводу вопросов 1 и 2 господина Тисса могу заменить следующее. Приложение функции системы контроля должно быть принципиально возможно. Возможно ли ее рациональное практическое приложение - это решает качество результатов.

Способ принципиально - с некоторыми ограничениями - приложим. Однако необходимо заметить, что ни один математический способ не приспособлен описывать полностью, без ограничений, естественный ход "стока".

Расстояние Инс-Вена было, в соответствии с топографией, обработано двумя различными, раздельными расчетными шагами. По поводу 3-его замечания господина Тисса могу сказать, что случайность характера параметров, как и следовало ожидать, показала себя. Работа была задумана как эксперимент для проверки влияния изменчивости параметров на качество результатов.

**Кунш:**

1. Каким образом учитывается влияние бокового притока на участке Ипс-Вена?
2. Какая разница в результатах прогноза между моделью, о которой идет речь и прогнозом, которым пользуется гидрографическая служба в настоящее время?

**Кирибауэр:**

К первому вопросу можно заметить, что целью работы была проверка отдельных модельных строительных камней одной большой модели. Поэтому в данное время был исследован лишь способ Калинина-Милюкова. Если будет возможно обойтись меньшим числом строительных модельных камней, то есть примерно посредством отказа от дополнительных над притоками, то модель была бы дешевле при ее применении на практике.

Уже было показано, что во многих случаях невозможно отказаться от дополнительной информации, поступающей посредством притоков.

Ко второму вопросу можно сказать, что из-за выше указанной специальной постановки проблемы не было проведено сравнение с тогда уже применяемыми методами.

**Андерль:**

В докладе господина Соседко речь идет о том, что практически получается одна и та же заблаговременность прогноза, независимо от того, делается ли прогноз на основе измеренного осадка, или на основе измеренного стока. Я хотел бы к этому заметить, что согласно нашему опыту заблаговременность прогноза от осадка до стока в малых речных бассейнах, которых можно снабдить станциями измерениями стока, составляет 3-10 часов в зависимости от вида бассейна. Если при не слишком крупных бассейнах общая заблаговременность прогноза составляет примерно 20 часов, то эта разница во времени вероятно сыграет некоторую роль; при больших бассейнах она никакую роль не сыграет.

**Сидорова:**

Предлагаемая схема предвычисления хода дождевого стока основана на использовании данных о расходах (уровнях) воды на малых реках в крупном речном бассейне (река Днестр). Для этого бассейна учет данных о фактических осадках практически не дает увеличения заблаговременности прогноза. Для малых же водосборов учет осадков безусловно необходим для увеличения заблаговременности прогноза.

ZUR PROBLEMATIK DER MODELLE FÜR INDIREKTE AUSWERTUNG VON WASSERVORRÄTEN IN DER SCHNEEDECKE

E. Šimo

К ПРОБЛЕМАТИКЕ МОДЕЛЕЙ КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЗАПАСА ВОДЫ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ

Э. Шимо

Zusammenfassung:

Das Referat beschäftigt sich mit einer Möglichkeit der indirekten Auswertung der Wasservorräte in der Schneedecke - mit einem Modell des Akkumulationsprozesses. Es analysiert kurz den vom Autor bereits früher präzisierten Akkumulationsindex  $A_{kn}$ , der von Angaben über die gesamten Tagesniederschläge  $Z$ , von den täglichen durchschnittlichen, maximalen und minimalen Lufttemperaturen  $T$ ,  $T_{max}$ ,  $T_{min}$  und Angaben über den degree-day factor  $\varphi$  ausgeht. Dieser Index stellt das einfachste Modell für die Gestaltung der Schneevorräte im Flußgebiet dar und besteht aus zwei entgegengesetzten Prozessen: Akkumulation und Schmelze.

Mit Rücksicht auf den wesentlichen Einfluß von Faktoren, die die Umwandlung des gegebenen Schneevorrates in Abfluß bestimmen, war eine Überprüfung der Richtigkeit der Berechnungen durch Vergleich der Werte des Schneevorrates mit der Abflußsumme der Frühjahrsschneeschemelze bisher nicht möglich. Da wir jetzt über genaue Messungen des Wasseräquivalentes der Schneedecke im Flußgebiet der Orava-Talsperre während der letzten 7 Jahre verfügen, war es jetzt möglich die Berechnungen zu überprüfen. Abb. 1 zeigt eine gute Obereinstimmung der errechneten Werte mit Werten aus direkten Messungen und bestätigt, daß Berechnungen nach diesem einfachsten Modell für die Bildung von Wasservorräten in der Schneedecke die Änderung der Akkumulationsgröße verhältnismäßig genau wiedergeben. Abb. 2 zeigt die gute Obereinstimmung zwischen Modellberechnung und Messungen in der Natur.

Zum Schluß enthält der Bericht kurze Bemerkungen über die Möglichkeit der Verfeinerung dieses einfachsten Modelles.

Резюме:

В докладе рассматривается одна из возможностей косвенной оценки запаса воды в снежном покрове - модель процесса аккумуляции. Коротко рассматривается индекс аккумуляции ( $A_{kn}$ ), уже перед этим уточненный автором, который вытекает из данных о суммарных дневных осадках ( $Z$ ), дневных средних, максимальных и минимальных температурах воздуха ( $T$ ,  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ) и данных о коэффициенте стаивания ( $\varphi$ ) (1). Этот индекс представляет самую простую модель образования запаса снега в бассейне, состоящего из двух противоположных процессов: аккумуляции и стаивания.

Сравнение вычисленных значений аккумуляции прямо с объемом стока из нее, не могло нам предоставить основу для проверки достоверности расчета ввиду существенного влияния факторов, определяющих трансформацию данной аккумуляции на сток. Это было возможно сделать в настоящее время, когда у нас имеются точные измерения водного эквивалента снежного покрова в бассейне Оравского водохранилища за последние 7 лет. Рис. 1 показывает хорошее соответствие вычисленных величин с величинами непосредственных измерений и подтверждает, что расчет по этой самой простой модели образования запаса воды в снежном покрове способен относительно отражать изменение величины аккумуляции. Рис. 2 показывает, что модель способна тоже дать количественные значения, которые близки к действительности, а точнее сказано, к прямым измерениям.

В заключении доклад содержит короткие замечания о реальных возможностях уточнения этой простой модели в данных природных условиях, а также в зависимости от объема и качества гидрометеорологических информаций в них.

Ausreichend genau gemessene hydrologische Parameter der Schneedecke stehen nur im beschränkten räumlichen und zeitlichen Umfang zur Verfügung, trotz des beträchtlichen Fortschrittes, der besonders in der letzten Zeit erreicht wurde. Daher ist es gegenwärtig ersatzweise noch notwendig, indirekte Auswertungen vor allem des wichtigsten Parameters, des Wasseräquivalentes der Schneedecke und der mit dessen Hilfe berechneten, in der Schneedecke des Flußgebietes akkumulierten Wasservorräte, zu verwenden. Es zeigt sich, daß in manchen Fällen diese indirekten Indexe ausreichend sein können und selbst direkte Messungen keine größere Verwendbarkeit aufweisen müssen; in diesen Fällen bleibt nur eine Sicherheit übrig - daß sie teurer werden. Und wenn es sich darum handelt, über einen kontinuierlichen Verlauf der Tageswerte der Wasservorräte in der Schneedecke im Laufe der Winter-Frühlingsperiode zu verfügen, so sind deren indirekte Auswertungen unumgänglich. Die Modellierung des Schneeakkumulationsprozesses in der Winter-Frühlingsperiode ist ein wertvolles Hilfsmittel für die indirekte Auswertung der darin befindlichen Wasservorräte geworden und dadurch auch für die Vorhersage des Abflusses aus der Schneedecke. Abgesehen von manchen anderen Möglichkeiten der indirekten Auswertung dieser Vorräte, die ich kurz bereits früher analysierte(12), möchte ich in diesem Beitrag die Mög-

lichkeit der Anwendung eines extrem vereinfachten Modells für die Bildung von Wasservorräten in der Schneedecke demonstrieren und mit einigen Bemerkungen auf reale Möglichkeiten der Präzisierung solcher Modelle hinweisen.

Der beträchtliche Fortschritt in der theoretischen und experimentellen Hydrologie gestattet es, den komplizierten Prozeß des Wasserkreislaufes in der Winter-Frühlingsperiode ausführlich zu beschreiben und analysieren. Beim Bemühen, diesen Prozeß zu modellieren, kommt es unausweichlich zu dessen Schematisierung, ganz gleich, ob es sich um den ganzen Komplex einschließlich Akkumulation, Schmelze und Abfluß handelt, oder nur, wie in unserem Fall, um den ersten Eintrittsblock des Modells, den Akkumulationsprozeß. Dieser Prozeß jedoch schließt immer, wenn es sich infolge der klimatischen Verhältnisse des betreffenden Flußgebietes um einen unterbrochenen Akkumulationsprozeß handelt, auch den Schmelzprozeß in sich ein. Die Stufe der Schematisierung hängt von den Bedingungen der Akkumulationsbildung im gegebenen Flußgebiet und von Umfang und Qualität der zugänglichen hydrometeorologischen Informationen ab. Im Falle vieler Flußgebiete ist es notwendig, diese Schematisierung ins Extrem zu treiben, um verwendbare Ergebnisse zu gewinnen. Es gibt dringende Probleme, die zu lösen sind, und nach dem gegenwärtigen Stand sind wir gezwungen auszunützen, was man ausnützen kann, damit wir geeignete Antworten geben können auf manche Frage der wasserwirtschaftlichen Praxis.

Der Akkumulationsindex  $Ak_n$ , den ich schon früher vorgelegt habe (14), geht von Angaben über die Gesamtwerte der täglichen Niederschläge  $Z$ , der täglichen durchschnittlichen, maximalen und minimalen Lufttemperaturen  $\bar{T}$ ,  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$ , Angaben über den degree-day factor  $\varphi$  aus, und wird folgendermaßen ausgedrückt:

$$Ak_n = (Ak_{n-1} + Z_n \cdot \eta) - (\bar{T}_n^+ \cdot \varphi) \quad [1]$$

Die Größe der Akkumulation an einem bestimmten Tag können wir folgendermaßen ausdrücken:

$$Ak_n - Ak_{n-1} = Z_n - [(Z_n - Z_n \cdot \eta) + (\bar{T}_n^+ \cdot \varphi)] \quad [2]$$

wo der Ausdruck  $[(Z_n - Z_n \cdot \eta) + (\bar{T}_n^+ \cdot \varphi)]$  die Verluste der Gesamtniederschläge in dem untersuchten Zeitabschnitt an Regenniederschläge und Schmelze aus den gebildeten Schneevorräten darstellt.

Der Index nach Formel [1] stellt das einfachste Modell der Bildung von Wasservorräten in der Schneedecke im Flußgebiet dar, die aus den zwei entgegengesetzten Prozessen der Akkumulation und der Schmelze besteht.

Die Ermittlung der Akkumulation besteht im Grunde aus der Erfassung derjenigen Menge des gesamten Niederschlages während der untersuchten Zeiteinheit, die als Schnee fiel. Hier mußten wir uns auf den Faktor beschränken, der bei der Bestimmung der Grundform des Niederschlages die entscheidende Rolle spielt, d.h. auf die Lufttemperatur, über die uns Angaben zumindest im beschränkten Ausmaß zur Verfügung stehen. Als Kriterium für die Bewertung der Grundform des gefallenen Niederschlages dienten Angaben über die täglichen Lufttemperaturen, und zwar  $\bar{T}$ ,  $T_{\max}$  und  $T_{\min}$ . Ich ging von der Annahme aus, die man in dieser Form ausdrücken kann:

$$\eta = \begin{cases} 1 & \text{wenn } T_{\max} < 0^\circ \text{ C} \\ \frac{T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} & \text{wenn } T_{\max} > 0^\circ \text{ C und } T_{\min} < 0^\circ \text{ C} \\ 0 & \text{wenn } T_{\min} > 0^\circ \text{ C} \end{cases} \quad [3]$$

wobei  $\eta$  der Koeffizient ist, der den Anteil von Schneeniederschlägen an den Gesamtniederschlägen in der betrachteten Zeiteinheit in % ausdrückt.

Durch die Multiplikation  $Z \cdot \eta$  bestimmen wir den Akkumulationsindex der Schneeniederschläge.

Zur extremen Vereinfachung der Auswahl von Faktoren tritt somit auch ein einfaches Schema der Berechnung nach dem gewählten Faktor hinzu.

Die Berechnung der Schmelze erlaubt uns diejenige Menge an akkumulierten Vorräten zu bestimmen, die noch im Laufe der Winterperiode schmelzen konnte. Den Schmelzindex gestaltete ich proportional zu der positiven durchschnittlichen Tagestemperatur der Luft  $\bar{T}^+$ , d.h. zu den positiven degree-days und den degree-day factor  $\varphi$ , ausgedrückt in mm des an einen positiven degree-day anfallenden Schmelzwassers. Die Abnahme der Akkumulation am betreffenden Tag  $U_n$  ist somit  $U_n = \bar{T}_n^+ \cdot \varphi$ . Die Möglichkeit der Abnahme können wir folgendermaßen charakterisieren:

$$U_n = \begin{cases} \bar{T}_n^+ \cdot \varphi & \text{für } \bar{T} > 0^\circ \text{ C, bzw. } \bar{T} > T_1 \\ 0 & \text{für } \bar{T} < 0^\circ \text{ C, bzw. } \bar{T} < T_1 \end{cases} \quad [4]$$

wobei  $T_1$  = Grenztemperatur ist, bei welcher die Schmelze eintritt.

Was den Wärmefaktor (degree-day Factor) betrifft, so ging ich zwar von einem durch ausländische Angaben begründeten Durchschnitt aus ( $\varphi = 2$  mm/Grad-Tag), jedoch wollte ich mich mit gewählten Werten um diesen Durchschnitt an folgende Tatsachen nähern. In der Periode der intensiven Schmelze ist der degree-day factor höher. Dies drückte ich durch dessen Erhöhung im gegebenen Monat aus, entsprechend dem Zuwachs der Lufttemperatur. In den Frühlingsmonaten ist, mit der anwachsenden Sonnenstrahlung, der degree-day Factor bei der gegebenen Temperatur höher. Das habe ich durch seine Erhöhung in die Richtung des Frühlings ausgedrückt. Das Regime des degree-day Factor ist jedoch, in Abhängigkeit vom advektiven, solaren oder gemischten Typus der Schmelze, von den meteorologischen Verhältnissen und vom Charakter der Winter-Frühlingsperiode, noch wesentlich komplizierter. Es ist zu bemerken, daß dieses Bemühen, zu einem gewissermaßen physikalisch begründeten Regime der  $\varphi$ -Werte zu gelangen, ausgesprochen schematisch erfolgt, ohne die Möglichkeit einer Anlehnung an die realen Werte unserer natürlichen Bedingungen zu haben. An dieser Stelle kann ich keine näheren Argumente anführen, die die extreme Schematisierung der Akkumulations- und Schmelzeberechnung rechtfertigen, und nach welchen die veränderlichen Werte des degree-day Factor ermittelt wurden. Die breiteren Ausführungen gebe ich an anderer Stelle wieder (13).

Mit Rücksicht auf den völligen Mangel an systematischen, während mehreren Jahren geführten und entsprechend genauen Messungen des Wasseräquivalentes der Schneedecke in irgendeinem Flußgebiet, war es früher unmöglich, die Anwendbarkeit dieses einfachsten Modells für die Bildung der Wasservorräte in der Schneedecke der Flußgebiete zu prüfen. Ältere Messungen des Wasseräquivalentes in standardisierten Niederschlagsmeßstationen enthalten so viel Fehler, daß es selbst bei einer monographischen Bearbeitung der Schneeverhältnisse auf dem Territorium der Slowakei (7) unmöglich war, sie zu benutzen. In der Arbeit (15) habe ich darauf hingewiesen, daß im Flußgebiet des Laborec (Michalovce) das Regime der Änderung des indirekten Akkumulationsindex in den einzelnen Jahren mit dem Regime der Änderung des Umfanges des Frühlingsabflusses vom Schnee ziemlich übereinstimmt ( $R = 0,65 - 0,70$  je nach Wahl der vorhergesagten Periode). Mit Rücksicht darauf, daß dieses Flußgebiet ein äußerst ungünstiger Fall ist, vom Standpunkt der geeigneten Angaben und Akkumulationsbedingungen (überwiegend niedrigeres Hügelland mit einem komplizierten Klimaregime im Winter), deutet auch diese Beziehung darauf hin, daß die Ergebnisse nach diesem Index sich im Bereich der praktischen Verwendbarkeit befinden werden. Dabei ist zu erwägen, daß man den ganzen Umfang der Abweichungen nicht der Ungenauigkeit des Index zuschreiben darf. Eine Reihe von Faktoren tritt noch hinzu, die die Transformation der gegebenen Akkumulation zum Abfluß bestimmen.

Im letzten Jahrzehnt organisierten die Mitarbeiter des Instituts für Hydrologie und Hydraulik der Slowakischen Akademie der Wissenschaften im Flußgebiet der Orava, bis zu der Talsperre von Orava (Nordslowakei), Messungen des Wasseräquivalentes der Schneedecke (2, 3, 8, 16, 17). Dies ermöglichte, die nach dem oben angeführten Verfahren berechneten Wasseräquivalente der Schneedecke mit exakten Messungen zu vergleichen. Die indirekte Berechnung geht von den durchschnittlichen Werten der Tagesniederschläge an 5 ausgewählten

meteorologischen Stationen des Standard-Netzes des Hydrometeorologischen Instituts (Oravská Lesná, Mútne, Oravská Polhora, Námestovo, Suchá Hora) und von den täglichen Lufttemperaturen in der Station Ústie nad Oravou aus. Alle angeführten Stationen liegen in der unteren Höhenzone (600 - 900 m), die aber den überwiegenden Teil des Flußgebietes repräsentiert. Direkte Messungen des Instituts für Hydrologie und Hydraulik der Akademie wurden in einem speziell ausgewählten Netz von Stationen durchgeführt, unter Berücksichtigung deren richtigen Flächenverteilung in den Höhenzonen, deren Exposition, sowie auch mit Rücksicht auf die Verteilung von bewaldeten und unbewaldeten Gebieten in den einzelnen Höhenzonen und Expositionslagen. Es wurde auch eine genauere Methode der Messung mittels repräsentativer Linienmessungen der Schneedecke angewendet.

Abb. 1 zeigt eine gute Übereinstimmung der berechneten Werte mit denjenigen der direkten Messungen und bestätigt, daß auch die nach dem einfachsten Modell durchgeführte Berechnung der Bildung von Wasservorräten in der Schneedecke fähig ist, die Änderungen in der Größe der Akkumulation relativ widerzuspiegeln. Und die Tatsache, daß die Regressionslinien in Abb. 2 sehr eng die Diagonale mit  $45^\circ$  Neigung verfolgen, ist ein Beweis dafür, daß das Modell fähig ist, nicht nur diese Änderungen in relativer Weise darzustellen, sondern auch der Wirklichkeit, genauer gesagt, den direkten Messungen nahe liegende, quantitative Werte zu bringen. Die bestehenden Abweichungen kann man hauptsächlich der äußerst schematisierten indirekten Berechnung zuschreiben, in Bezug auf die Auswahl der Parameter und flächenmäßigen Repräsentativität der verwendeten Angaben. Aber auch die erwähnten direkten Messungen, obwohl sie von allen bei uns gemachten am genauesten waren, tragen in sich ein gewisses Maß der Unsicherheit, die weder ein spezielles Netz, noch genauere Geräte oder genauere Meßmethoden beseitigen können. Es ist also möglich, indirekte Berechnungen überall zu verwenden, wo keine genügend genauen direkten Messungen vorhanden sind, oder wo diese ungenügend sind. Aber auch dort sind sie verwendbar, wo wir zwar direkte Messungen in bestimmten, meistens längeren Zeitabständen besitzen, aber einen kontinuierlichen Verlauf der Tageswerte für die untersuchte Periode benötigen. Da es sich hier um die grundlegendsten Eingangsangaben für die Rechnung handelt, um grundlegende, am meisten zugängliche meteorologische Elemente, nämlich Niederschlag und Lufttemperatur, kann man die Berechnung auch in größeren Flußgebieten durchführen. Aufgrund der Ergebnisse des oben angeführten Vergleichs kann man konstatieren, daß solche Berechnungen auch einen bestimmten ökonomischen Effekt darstellen. Der große Mangel an geeigneten hydrometeorologischen Unterlagen garantiert die Lebensdauer solcher vereinfachten Berechnungen auf längere Zeit. Die Grenze der Detailierung der Akkumulationsmodelle, wenn diese praktisch anwendbar sein sollen, wird gerade von dem Umfang und Qualität dieser Unterlagen bestimmt.

Die Notwendigkeit von Extrapolation geeigneter Punktmessungen in größere Flußgebiete und alle Höhenzonen stellt ein weiteres kompliziertes Problem dar, das die Schematisierungsstufe des Modells beeinflusst. Großen Schwierigkeiten begegnen wir bereits bei Punktberechnungen z.B. der Grundformen der Niederschläge und der Größe der Schmelze, bzw. bei solchen Berechnungen in einem mikroräumlich verteilten Netz. Die räumliche Interpolation und Extrapolation von Punktberechnungen in größere Flußgebiete, die vom wasserwirtschaftlichen Standpunkt aus in Betracht kommen, mit kompliziertem Relief, Höhenverteilung, Exposition oder Neigung der Abhänge, mit komplizierter Verteilung der Pflanzendecke, stößt auf noch größere Schwierigkeiten.

Die Präzisierung solcher Akkumulationsberechnungen und korrigierte Berechnungen der anderen Indexe sind grundlegende Voraussetzungen für die Zusammenstellung eines hydrologisch fundierten, praktisch verwendbaren Modells für die Vorhersage der Schneeabflußmenge.

Reale Möglichkeiten der Präzisierung in unseren Bedingungen ersehe ich in der räumlichen Interpolation und Extrapolation der Werte für alle Höhenzonen des Flußgebietes mittels Ableitung ausgewählter Niederschlags- und Temperaturgradienten. Eine weitere wesentliche Präzisierung besteht in einem komplexeren Modell für die Bildung von Wasservorräten in der Schneedecke des Flußgebiets, das in sich eine genauere Berechnung der auf das Flußgebiet gefallenen Niederschlagsmengen, der Verteilung dieser nach Grundformen, der Verluste an akkumulierten Niederschlägen infolge Schmelze und Berechnung der verbliebenen Akkumulation, die zum Abfluß zur Verfügung steht, einschließt. Ein anschauliches Beispiel dafür befindet sich in der Arbeit (5). Ausgehend von meteorologischen Angaben, außer direkter Angabe über die Schneedecke, legten die Autoren zwei

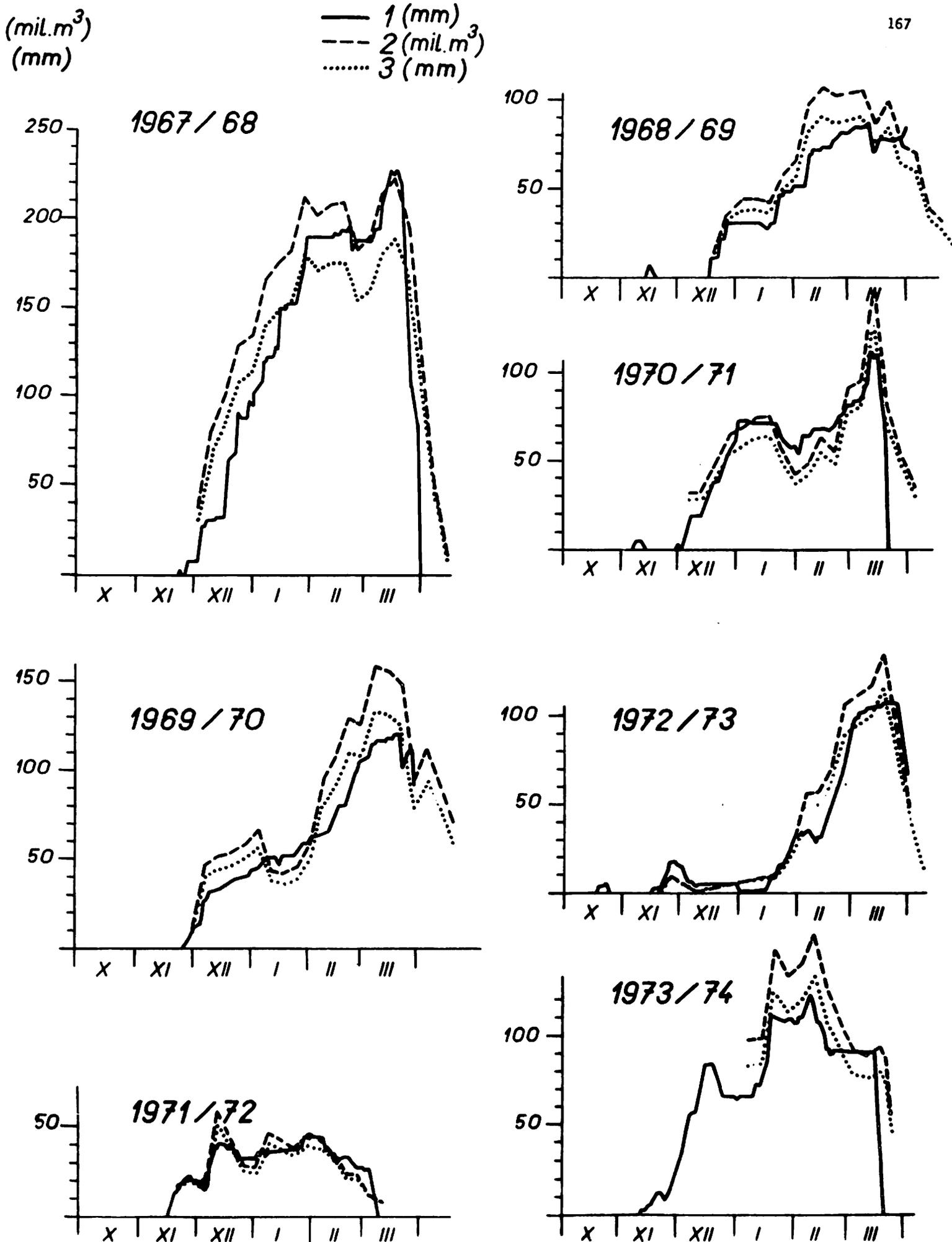


Abb. 1: Verlauf der Wasseräquivalente der Schneedecke (in mm) im Flußgebiet der Orava-Talsperre in den Jahren 1967-68 bis 1973/74.

- 1. ————— indirekte Berechnung
- 2. - - - - - Wasservorrat in Mill.m<sup>3</sup> nach direkten Messungen
- 3. ..... direkte Messungen

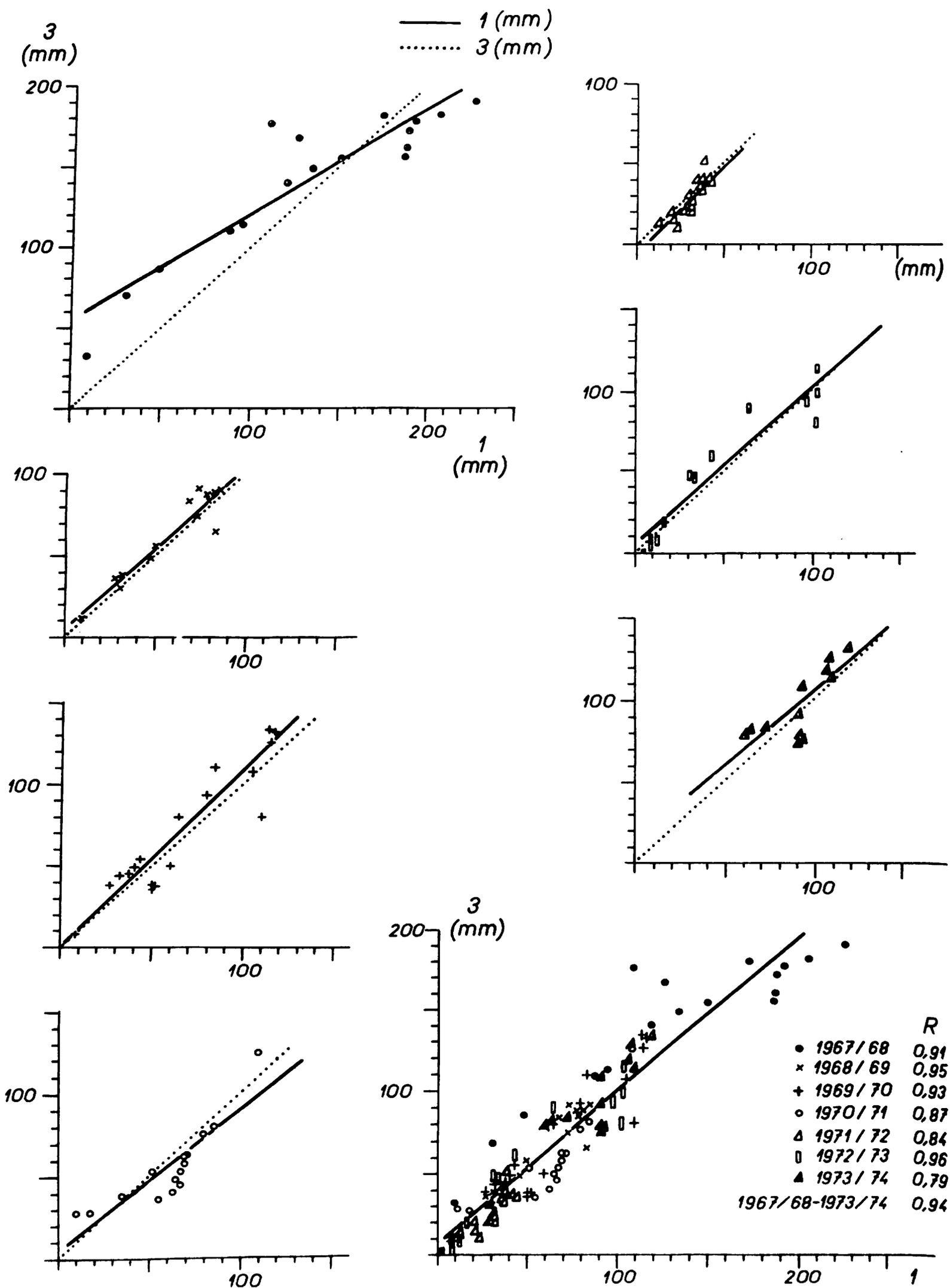


Abb. 2: Beziehung der Wasseräquivalente der Schneedecke (in mm) im Flußgebiet der Orava-Talsperre in den Jahren 1967/68 bis 1973/74.

- 1. ————— indirekte Berechnung
- 2. .... direkte Messungen



13. Šimo, E. Výpočet nepriameho indexu zásob vody v povodí pomocou údajov o úhrnných zrážkach a teplote vzduchu. Vodohospodársky časopis, 23, 1975, č. 6 (v tlači).
14. Šimo, E. K možnosti prognoza objema vesenného stoka v bassejnach čechoslovakických Karpat. In : III - ème confèrence internationale des pays danubiens sur les prévisions hydrologiques. Bucuresti, 1965.
15. Šimo, E. Jarné vodnosti Laborca - podmienky ich utvárania a možnosti prognózy. In : Sborník - Problémy geografického výskumu. Vydavateľstvo SAV, Bratislava 1971.
16. Turčan, J. Možnosti určenia zásoby snehu v povodí Oravskej nádrže. Konferencia - Nové poznatky o zákonitostiach pohybu vody a tvorbe vodných zdrojov. Banská Bystrica 1973.
17. Turčan, J. Režim snehových zásob v povodí a ich určenie. Kandidátska dizertačná práca. OIII-SAV, Bratislava 1972.

НЕКОТОРЫЕ УСТОЙЧИВЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОДНОЙ  
ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

В.М.Мухин

EINIGE STABILE METHODEN ZUR LÖSUNG EINER  
UMKEHRAUFGABE HYDROLOGISCHER VORHERSAGEN

V.M.Muchin

Резюме

Рассматриваются устойчивые методы решения задачи нахождения ординат неизвестной функции (x) по результату (y) воздействия на нее известным оператором (A).

В качестве примера предлагается типичная задача: определение на основе решения уравнения Винера-Хопфа оптимальной импульсной переходной функции линейной системы (в терминах гидрологии - кривой добега стока для бассейна или участка реки) по данным на ее входе и выходе.

Один метод ее решения основан на сужении области определения оператора на устойчивое подпространство (способ разрежения информации).

Другой метод является обобщением компонентного анализа на основе теории решения некорректных задач. Он представляет собою двухпараметрическую процедуру подавления или отбрасывания компонентов решения, с которыми связана неустойчивость, возникающая из-за погрешностей исходных данных и плохой обусловленности системы. Для определения параметра подавления или числа удерживаемых компонентов используются объективные (а также квазиобъективные) критерии.

Zusammenfassung

Bei gegebenem Ausgang (y) und gegebener Übertragungsfunktion (A) soll der Eingang (x) berechnet werden.

Als Beispiel wird eine typische Aufgabe gewählt: Bestimmung einer optimalen Impulsresponsefunktion eines linearen dynamischen Systems aufgrund der Lösung der Wiener-Hopf-Gleichung nach den Eingangs- und Ausgangswerten.

Eine Methode beruht auf der Einengung des Bestimmungsbereiches des Operators auf den stabilen Unterraum (Verfahren der Informationsminderung).

Eine andere Methode ist die Erweiterung der Komponentenanalyse. Sie stellt einen Vorgang dar, bei dem zwei Parameter berücksichtigt oder die Lösungskomponenten ausgeschlossen werden, die wegen auftretender Fehler bei den Ausgangswerten und einer schlechten Begründung des Systems eine labile Lösung ergeben. Für die Parameterbestimmung werden quasiobjektive Kriterien verwendet.

При описании гидрологических процессов и разработке методов их прогнозов с использованием понятия о бассейне или участке реки как о физической динамической системе широкое распространение получили линейные модели. Нахождение числовых значений характеристик линейных моделей по входным и выходным данным динамической системы относится к классу обратных задач и в большом числе случаев сводится к решению уравнения вида

$$Ax = y$$

[1]

в котором требуется определить значения координат неизвестной функции x по результату воздействия на нее известным оператором A. Обратные задачи, как правило, некорректно поставлены в смысле Азамара.

Поэтому получаемые характеристики изучаемого процесса часто противоречат физическим представлениям о них. Такие результаты имеют вид так называемых "разболтанных" (неустойчивых) решений.

В качестве типичной обратной задачи рассматривается определение оптимальной (в смысле минимума среднеквадратической ошибки) импульсной переходной функции (сокращено ОИПФ) динамической системы, в терминах гидрологии - кривой добега сток для бассейна или участка реки.

При нахождении ОИПФ обычно приходят к решению дискретного аналога интегрального уравнения Винера - Хопфа

$$R_{qQ}(t^*) = \sum_{j=1}^{n-1} R_{qq}(t^* - j\Delta\tau) p(j\Delta\tau)\Delta\tau \quad [2]$$

$$0 \leq t^* \leq n; \quad t^* = 0, \Delta\tau, \dots, (n-1)\Delta\tau; \quad p(j\Delta\tau) = 0 \quad \text{при } t^* < 0$$

где  $R_{qQ}$  - вектор взаимной корреляции входных данных;  $R_{qq}(t^* - j\Delta\tau)$  - корреляционная матрица входных данных; уравнение [2] можно рассматривать как алгебраическую систему вида [1]

Решение обратной задачи [2] дает значения ординат  $p(j\Delta\tau)$  кривой ОИПФ, форма или аналитическое выражение которой заранее не задается. Понятие ОИПФ является более широким, чем понятие об известной в гидрологии кривой добега сток. Оно известно со времени развития А.Н.Колмогоровым и Н.Винером идей об оптимальной интерполяции и экстраполяции и часто встречается в автоматическом управлении; некоторые задачи в области метеорологии в такой же постановке решались Ф.Томсоном, Б.В.Овчинским; в гидрологию это понятие введено сравнительно недавно (7), используется также в работах (3 - 5).

Попытки определения ОИПФ прямым применением метода наименьших квадратов и линейного программирования не дали положительных результатов. Оказалось, для получения характеристик линейных моделей (в том числе и ОИПФ) по входным и выходным данным требуются особые подходы. Общим для этих подходов является замена "точной" задачи приближенной параметрической и выбор решения, из числа приближенных с помощью некоторой дополнительной информации. Такие подходы к решению обратных задач в общем можно объединить под названием стабилизирующих алгоритмов.

Методы, реализующие названные подходы, разработаны в теории, решения некорректных задач, созданной советскими математиками А.И.Тихоновым, В.К.Ивановым и др. Некоторые методы теории некорректных задач были применены в работах (3 - 5).

Для получения достаточного устойчивого решения рассматриваемой обратной задачи можно использовать и некоторые другие стабилизирующие алгоритмы. Автором применялся с той же целью компонентный анализ, дополненный объективными критериями выбора приближенного решения. Однако, этот вопрос в гидрологии еще мало изучен.

В докладе сначала представляется весьма простой в математическом отношении способ для повышения устойчивости результатов определения характеристик линейных моделей по входным и выходным данным динамической системы на примере определения ОИПФ. В нем используется метод наименьших квадратов и возможность варьирования величиной интервала  $\Delta\tau$  между отсчетами исходных данных.

Способ основан на изменении области определения оператора на устойчивое подпространство

$R_k \in R_n$ . Это сужение достигается уменьшением порядка аппроксимирующей системы линейных уравнений, регулируемым изменением шага  $\Delta t = \Delta \tau$  между точками, в которых фиксируются исходные данные.

Промежуток времени  $\Delta \tau$  должен быть как можно меньше. Это позволяет точнее аппроксимировать интегральный оператор конечно-разностным и обеспечить сохранение "тонкой структуры" в решении. Но уменьшение  $\Delta \tau$  делает матрицу  $A$  плохо обусловленной, а решение чувствительным к ошибкам вычислений и исходных данных.

Стабилизирующий алгоритм удается построить, используя величину  $\Delta \tau = i \Delta \tau^*$  в качестве параметра, где  $\Delta \tau^*$  - масштабная единица отсчета времени для самих исходных данных или сдвига его для корреляционных функций. Тогда исходная задача заменяется поиском приближенного решения  $\tilde{X}_{\Delta \tau = i \Delta \tau^*}$ , которое является формально точным решением  $\tilde{X}_{\Delta \tau}$  для выбранного числа исходных координат решения аппроксимирующей задачи, где  $i=1,2,\dots,k < n$ . Причем степень аппроксимации согласуется со степенью пологости автокорреляционной функции (обусловленностью матрицы  $A$ ) и величиной погрешности данных измерений с помощью параметра  $\Delta \tau$ .

Увеличением  $\Delta \tau$  достигается доминирование диагональных элементов матрицы, что вместе с уменьшением ее порядка повышает устойчивость результатов.

Такой путь решения задачи был применен для нахождения ИОПФ на участке р. Лены между постами Солянка и Табага (расстояние 551 км). Выборка наблюдений сознательно была взята небольшой  $N$  - число случаев - 24, при  $n=11$ ). Как видно на рис.1 найденное формальное решение при  $\Delta \tau = 1$  весьма далеко от уже твердо установленного гидрологами общего вида кривой добегания стока на участке реки - разница между значениями соседних ординат достигает 4,8

Увеличение  $\Delta \tau$  до 2 суток оказалось достаточным для получения решения, отвечающего общему виду кривой добегания.

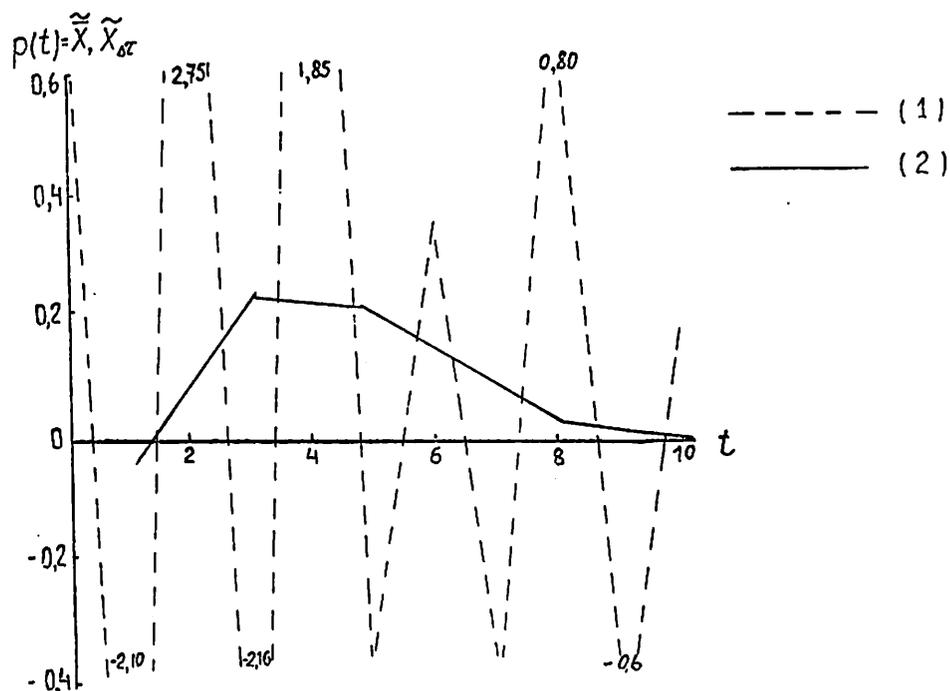


Рис.1. Импульсные переходные функции для участка п. Солянка-п. Табага на р. Лене, полученные: (1) - при  $\Delta \tau = 1$  сут.; (2) - при  $\Delta \tau = 2$  сут.

Обратим внимание на то, что увеличение расчетной выборки с 24 до 240 случаев приводило к ограниченному, но определенному улучшению решения - максимальная разница между соседними значениями ординат снизилась до 0,6. Решения же  $\tilde{X}_{\Delta T=2}$  практически не изменялось с увеличением объема выборки.

Величина параметра  $\Delta T$  не обязательно должна быть постоянной в одной и той же задаче. Ее можно менять, руководствуясь, например, изменением наклона автокорреляционной функции к оси абсциссы или величиной ее производной. В наших задачах это приносило определенный успех.

Расчеты показали, что изложенный способ устойчивого определения характеристик линейных моделей применим также для нахождения весовой функции, позволяющей рассчитывать трансформацию паводочной волны только по наблюдениям за уровнями на верхнем и нижнем постах.

Можно лишь отметить некоторое уменьшение "разболтанности" решений.

Ввиду своей физической ясности задача определения ОИПФ, являющаяся линейной обратной задачей, удобна как пример, на котором можно исследовать влияние неполноты системы аргументов в регрессионных моделях гидрологических процессов.

Значения ординат на концах ОИПФ обычно малы. Поэтому при решении прямых задач с использованием ОИПФ этими ординатами можно пренебречь, и решение задачи заметно не ухудшится (в частности не ухудшится расчет гидрографа в нижнем створе). Однако в обратных задачах такое уменьшение размерности системы немедленно ухудшает ее решение. Этот эффект следует иметь в виду при выборе структуры линейных моделей. Пренебрежение "малозначимыми" аргументами, не согласованное с улучшением обусловленности системы уравнений, приводит к повышению неустойчивости решения (рис.2).

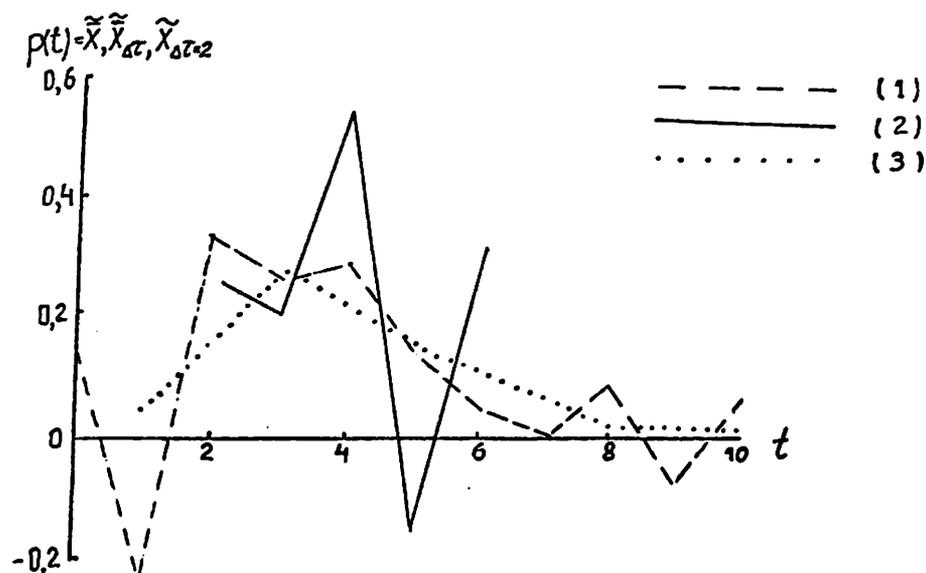


Рис.2. Иллюстрация влияния способа упрощения модели явления. Оптимальные ИПФ, полученные при  $N = 240$ : (1) -  $n = 11$  и  $\Delta T = 1$  сут.; (2) -  $n = 5$  и  $\Delta T = 1$  сут.; (3) -  $n = 5$  и  $\Delta T = 2$  сут.

Упрощение линейных моделей процессов, характеризуемых однородными физическими величинами путем сужения оператора по способу разрежения исходных данных более надежно. Способ разрежения является частным случаем способа просеивания (4).

Компонентный анализ в отличие от способов просеивания и разрежения позволяет находить искомое решение, не прибегая к сужению самого оператора. Его смысл состоит в отыскании проекции решения на оптимальным образом определенное подпространство, натянутое на первые  $(U_j)_{j=1}^{j=k}$  собственные векторы ( $k < n$ ) симметричной матрицы  $A$ . Здесь степень приближения регулируется числом удерживаемых компонентов :

$$\bar{x}_k = \sum_{j=1}^{k < n} \lambda_j^{-1} \beta_j U_j \quad ; \quad \beta_j = (y, U_j) \quad [3]$$

где  $\lambda$  - (спектр  $A$ ) собственные числа.

Другая представляемая процедура отличается тем, что позволяет обходиться без сужения оператора или его спектра и в большей степени учитывает особенности спектра погрешностей исходных данных:

$$\tilde{x}_\alpha = \sum_{j=1}^n \beta_j (\lambda_j + \alpha \lambda_j^{-m})^{-1} U_j \quad [4]$$

где  $\alpha$  и  $m$  - параметры.

Величина параметра  $m$  зависит от спектра погрешностей исходных данных и спектра  $A$ . Так, при значении  $m=0$  формула [4] превращается в процедуру В.К.Иванова, а при  $m=0$  компоненты, соответствующие  $\lambda = 0$ , отбрасываются как в КА (компонентном анализе).

Формулу [4] можно вывести из общего приема построения регуляризирующих (в смысле А.Н.Тихонова) алгоритмов [1].

Присутствие в формуле [4] параметров  $\alpha$  и  $m$  усложняет ее по уравнению с процедурой КА, однако делает более универсальной, позволяя сохранить полезную информацию в компонентах при малых значениях  $\lambda_j$ .

В теории решения некорректных задач разработан ряд критериев выбора приближенного решения обратной задачи, из числа доставляемых стабилизирующими процедурами. К способу разрежения наиболее подходящим является критерий невязки, смысл которого состоит в том, что невязка получающаяся после применения стабилизированного решения в прямой задаче, должна быть согласована с известной точностью исходных данных ( $\delta$ ). В тех случаях, когда есть общее представление о закономерностях развития изучаемого процесса, достаточно бывает внешнего вида получаемых приближений, чтобы сделать вполне удачный выбор необходимого интервала дискретности.

В работе (5) показана принадлежность КА к семейству стабилизирующих алгоритмов. На этом основании он был дополнен объективными критериями числа удерживаемых компонентов, разработанными в теории решения некорректных задач. Здесь предлагается квазиобъективный метод, основанный на идее выбора квазиоптимального значения параметра регуляризации (6).

Число ( $K$ ) удерживаемых компонентов определяется величиной  $\beta_{j=k} \lambda_{j=k}^{-1}$ , при которой функция:

$$\zeta(K) = \|\tilde{x}_k - \tilde{x}_{k-1}\| = \left\| \sum_{j=1}^k \beta_j \lambda_j^{-1} U_j - \sum_{j=1}^{k-1} \beta_j \lambda_j^{-1} U_j \right\| \quad [5]$$

достигает своих локальных минимумов. Найти эту величину по графику амплитудной характеристики  $[\beta_j \lambda_j^{-1}]$  просто. Как показали численные эксперименты, в задачах нахождения ОИПФ с помощью КА этот минимум обычно хорошо выражен (рис.3).

Также как и КА формулу [4] можно применять с любыми подходящими дополнительными условиями. Например, можно задать эти условия радиусом, компактного множества допустимых решений (критерий В.К.Иванова)

$$(\bar{X}_\alpha, \bar{X}_\alpha) = \sum_{j=1}^n \lambda_j^{2m} \beta_j^2 (\lambda_j^{m+1} + \alpha)^{-2} \leq R \quad [6]$$

где  $R^2 = (X, X)$  и задано, или значением квадрата нормы погрешностей величин  $h = h + \Delta$ , измеряемых на выходе системы ( $\|\Delta\|^2 = \delta^2$ )

$$\delta^2 - (\tilde{h}, \tilde{h}) + \sum_{j=1}^n \beta_j^2 (\lambda_j^{m+1} + 2\alpha) \lambda_j^m (\lambda_j^{m+1} + \alpha)^{-2} = f(\alpha) \approx 0 \quad [7]$$

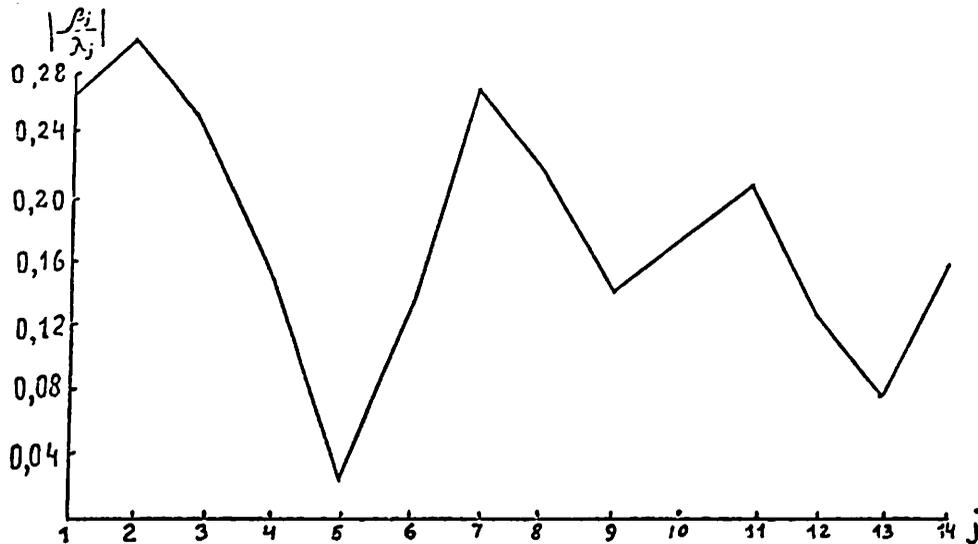


Рис. 3. Изображение распределения модулей амплитудных характеристик при нахождении ОИПФ с помощью квазиобъективного критерия (для бассейна р. Вычегды до г. Сыктывкара).

Результаты приложения процедуры [4] к задаче нахождения ОИПФ для р. Вычегды и Тверца, а также модельных задачах оказались наиболее успешными при  $m=2$  и в сочетании с дополнительными условиями [6]. Модельные задачи ставились для того, чтобы иметь возможность сравнивать решения, полученные с помощью стабилизирующих алгоритмов, с известным "истинным" решением (рис. 4).

При отсутствии надежной априорной информации в виде величин  $R^2$  или  $\delta^2$  предлагается использовать метод разрежения или КА, позволяющие рациональнее использовать интуитивные представления о структуре решения и из опыта отобрать наиболее надежные составляющие, по которым названные величины оцениваются и в дальнейшем применяются с процедурой, включающей параметр  $\alpha$ . Большую помощь может оказать сопоставление в КА графиков спектра  $A$  и модулей амплитудной характеристики  $|\beta_j \lambda_j^{-1}|$ .

Кроме уже отмеченных, важное свойство, стабилизирующих алгоритмов состоит в том, что они позволяют находить устойчивые решения обратных задач по малым выборкам, с которыми раньше подобные задачи не решали.

С внедрением в практику гидрологических прогнозов ЭВМ появились новые возможности усложнения моделей процесса речного стока, но это означает, что нахождение параметров таких моделей по входным и выходным данным часто будет являться задачей неустойчивой и следо-

вательно, требующей применения устойчивых методов решения - стабилизирующих алгоритмов.

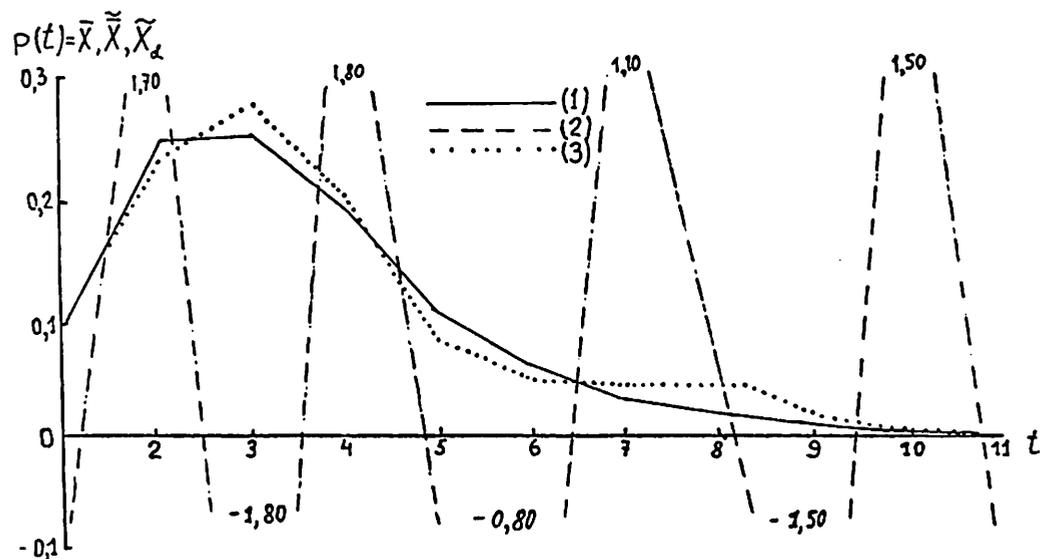


Рис. 4. Составление истинного  $\bar{X}$  (1), формального  $\tilde{X}$  (2) и стабилизированного  $\tilde{X}_\alpha$  (3) с помощью двухпараметрической процедуры (4) решений модельной задачи нахождения ОИПФ.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бакушинский А.Б. Один общий прием построения регуляризирующих алгоритмов для линейного некорректного уравнения в гильбертовом пространстве. Журнал "Вычислительная математика и математическая физика", т. 7, № 3, 1967 г.
2. Иванов В.К. 0 линейных некорректных задачах. Докл. АН СССР, т. 145, № 2, 1962.
3. Кучмент Л.С. Определение функций влияния для линейных моделей стока. Труды Гидрометцентра СССР, вып. 25, 1968.
4. Мухин В.М. Применение эмпирических ортогональных функций к рейсовым прогнозам минимальных уровней воды. Труды Гидрометцентра СССР, вып. 25, 1968.
5. Мухин В.М. Решение некоторых обратных задач в гидрологии при помощи регуляризирующих алгоритмов. Труды Гидрометцентра СССР, вып. 55, 1969.
6. Тихонов А.Н., Гласко В.Б. 0 приближенном решении интегральных уравнений Фредгольма 1 рода. Журнал "Вычислительная математика и математическая физика". 1964.
7. Eaglson P.S., Mejia R., March F. Computation of optimum Realizable Unit Hydrographs. Water Resources Research, vol. 2, №4, 1966.



ПРОГНОЗ ГИДРОГРАФА ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ РЕК БАССЕЙНА  
ТИСЫ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТОКА  
МАЛЫХ РЕК И ОСАДКОВ

Лыло В.М., Жидкова Л.В.

VORHERSAGE DER ABFLUSSGANGLINIE VON REGENHOCHWÄSSERN  
IM EINZUGSGEBIET DER THEISS AUF DER GRUNDLAGE VON  
NIEDERSCHLAG-ABFLUSSBEZIEHUNGEN

Lylo V.M., Židkova L.V.

Резюме

Рассматривается модель прогноза гидрографа дождевых паводков для горных рек, сток которых с части площади водосбора зарегулирован водохранилищами объемом 10 - 40 млн.м<sup>3</sup>. На основании прогноза обеспечивается определенный режим пропусков воды, чтобы избежать наводнения на нижнем участке, где в период паводков формируется значительный промежуточный и боковой приток с незарегулированной части водосбора.

В расчетах последовательно рассматривается ряд процессов: характеристика притока в русловую сеть устанавливается по стоку малых рек; гидрограф притока в водохранилище и сброс воды через замыкающий створ на нижнем участке рассчитываются по частным трансформационным функциям. Для прогноза стока малых рек на период заблаговременности используется зависимость его от осадков и предшествующего увлажнения водосбора. Расчетная единица времени устанавливается в зависимости от площади водосбора и от условий неравномерности подачи воды на водосбор.

Zusammenfassung

Hier wird ein Vorhersagemodell der Abflußganglinie für Regenhochwasser von Gebirgsflüssen betrachtet, deren Abfluß in Teileinzugsgebieten durch Speicherbecken mit einem Inhalt von 10 - 40 Millionen m<sup>3</sup> reguliert wird. Auf Grund der Prognose erfolgt die Bewirtschaftung der Speicherbecken, um Überschwemmungen im Unterlauf zu vermeiden. Das Hochwasser im Unterlauf wird durch den unregulierten Hochwasserabfluß der Zwischeneinzugsgebiete bestimmt.

In den Berechnungen werden aufeinanderfolgend eine Reihe von Prozessen betrachtet: die Charakteristik des Zuflusses in das Flußbettnetz wird nach dem Abfluß der kleinen Flüsse bestimmt; die Abflußganglinie des Zuflusses in das Staubecken und des Abflusses aus dem Speicher werden nach den speziellen Transformationsfunktionen berechnet. Für die Prognose des Abflusses der kleinen Flüsse für den Vorhersagezeitraum wird seine Abhängigkeit von den Niederschlägen und der vorangehenden Bodenfeuchtigkeit des Einzugsgebietes benutzt. Die Zeitintervalle der Vorhersage werden in Abhängigkeit von der Fläche des Einzugsgebietes und von der Niederschlagsintensität bestimmt.

Развитие водохозяйственного строительства в ливнеопасных горных регионах и возрастающая роль многостороннего регулирования высокого и низкого речного стока в решении общей проблемы, служащей борьбе с наводнениями и для водообеспеченности народного хозяйства, выдвигают ряд сложных вопросов, связанных с прогнозированием объемов и гидрографа стока паводков. В настоящее время при разработке методов и выпуске прогнозов необходимо учитывать преобразующие условия формирования речных вод под воздействием мелиорации и осуществляемых паводкозащитных мероприятий. Появляется необходимость в создании методики надежного прогноза паводков для относительно небольших рек с площадями водосборов 500 - 1 500 км<sup>2</sup>. При эксплуатации водохранилищ требуется соблюдение определенного режима, чтобы избежать наводнений на нижних участках рек, где имеет место значительный промежуточный и боковой приток. Режим работы водохранилища должен назначаться с учетом ожидаемого по прогнозу притока воды и рассчитанного с максимально возможной заблаговременностью гидрографа стока в замыкающих створах нижнего участка. Потребность в краткосрочных прогнозах объема и гидрографа стока возрастает при резервировании и использовании для водопотребления объемов воды противопаводочных призм. На малых водохранилищах при наличии надежного прогноза стока объема воды противопаводочных призм могут быть использованы в межпаводочные засушливые

периоды для обеспечения водопотребителей. При современной гидрометеорологической изученности к числу наиболее распространенных схем прогнозирования хода стока в бассейне Тисы следует отнести комплексный метод, основанный на учете характеристик водоотдачи в русловую сеть (стока показательных бассейнов). Метод предусматривает предвычисление стока показательных бассейнов (малых рек) на период заблаговременности прогноза по осадкам. Этот метод обеспечивает вполне удовлетворительные прогнозы и достаточную заблаговременность, если его использовать комплексно, совместно со схемой ориентировочного предвычисления хода стока малых рек по осадкам (3).

Методы, в основу которых положен учет характеристик притока в русловую сеть, имеют преимущество перед другими схемами прогноза стока в том, что не требуют определения потерь стока и отдельного учета талой и дождевой составляющих. Применение его ограничено только гидрологической изученностью малых рек, количеством и размещением пунктов измерения расходов воды и качеством подсчета стока по всей амплитуде колебания уровня воды.

Для прогнозирования хода стока, минуя вопрос о поступлении и распределении в пространстве и времени осадков, а также поглощения воды почвой и ее задержания водосбором (потери стока), в условиях бассейна Тисы рассматривается методика прогноза, которая испытана и дала вполне удовлетворительные результаты. Для того, чтобы малого бассейна можно было принять за показатель водоотдачи большого бассейна требуется выполнить условия равенства объемов стока за время паводка для показательного и расчетного водосборов. Для характеристики притока воды в речную сеть площади малых водосборов должны быть достаточно велики, или их должно быть достаточное количество, чтобы отразить хотя бы приближенно осредненные условия формирования стока в рассматриваемой части большого водосбора. Показательные бассейны должны быть также и достаточно малы, чтобы продолжительность руслового добега не сказывалась заметно на заблаговременности прогноза. В этом сложность применения этого метода прогноза для горных рек, если учитывать современную гидрологическую изученность малых рек.

Особенно важен выбор необходимого числа показательных бассейнов при расчетах и прогнозах хода смешанного, тало-дождевого стока на горных реках. Условия формирования стока в разных частях такого бассейна значительно отличаются. В то время, как в нижних зонах водосбора подача воды в русловую сеть отсутствует, или определяется поступлением жидких осадков, в верхних зонах может происходить интенсивное таяние снега. В таких условиях рассчитать ход стока без учета пространственной неравномерности водоотдачи практически не возможно.

Задача прогнозирования гидрографа паводка обычно решается с учетом гидрометеорологической изученности малых рек. Используется существующая сеть, изучающая сток малых рек. Устанавливать критерий, разграничивающий малые реки не следует, так как необходимо выпускать прогнозы не только в замыкающем створе данного большого водосбора, но и в ряде верхних транзитных створах. Установить единый, вполне приемлемый для всех водосборов, размер площади бассейна малой реки не удастся. Кроме того, при выборе малых бассейнов следует учитывать наличие поймы, уклоны реки, ряд других геоморфологических факторов, влияющих на форму гидрографа паводка. Ограничивать не только верхний, но и нижний предел малого бассейна необходимо в связи с назначением расчетного интервала времени и осложнением расчетов при отсутствии ЭВМ, когда используется значительное количество частных трансформационных функций (3).

Во всех случаях для расчета гидрографа требуется приводить в соответствие сток за отдельные паводки или расчетные интервалы на малой реке со стоком в замыкающем створе. Для установления соответствия объемов стока малой и большой реки в практических расчетах

часто применяются коэффициенты стоковой приводки  $K$  (2,5). Предвычислить коэффициент  $K$  на период заблаговременности прогноза для отдельных расчетных интервалов времени не удается, особенно для рек горных районов. При использовании  $K$  в расчетах частных трансформационных функций и при автоматизации сбора, обработки информации и выпуска прогнозов на ЭВМ, расчет коэффициента  $K$  во всех случаях становится невозможным. В связи с тем, что коэффициент  $K$  физически не обоснован, практически нельзя решить вопрос, как его использовать в расчетах - постоянным или переменным, а также когда учитывать - при расчетах характеристик притока или вводить в конечные результаты при определении гидрографа в замыкающем створе.

При современной изученности стока малых рек чаще всего нельзя вести расчеты по частным трансформационным функциям с учетом каждого малого водосбора. Необходимо сток на отдельных из них объединить по зонам. Устанавливаются "веса" станций, что лучше всего сделать по зависимости стока малого и большого водосборов. При современной гидрометеорологической изученности, когда имеет место случайное распределение гидростворов, на которых изучается сток на малых реках, нельзя исходить из того, что чем по большему количеству малых рек характеризуется приток воды в русловую сеть, тем можно получать лучшие результаты расчета гидрографа в замыкающем створе. Обычно в горной местности лучше всего изучен сток малых рек пониженной зоны. В связи с этим, в расчетах будет искажаться характеристика притока, полученная по стоку отдельных малых рек, расположенных в основной зоне питания реки. Кроме того, необходимо считаться с требованиями быстрого выпуска прогнозов, в связи с чем при отсутствии автоматизации количество используемых трансформационных функций должно быть минимальным.

Для перехода от частных гидрографов к прогнозу (распределению) стока используется метод коаксиальной графической корреляции (3). Коаксиальная зависимость между многими переменными приводит в соответствие рассчитанные объемы стока с фактическими. Этот метод позволяет перейти от расчетного гидрографа паводка непосредственно к прогнозу стока за отдельные интервалы времени. Графические зависимости могут быть заменены математическими выражениями, что дает возможность при выпуске прогнозов использовать ЭВМ.

Схему прогона рассмотрим на примере бассейна р. Тересвы до створа Нересницы, которым замыкается площадь водосбора  $1\ 100\ \text{км}^2$ . Для расчета принят полусуточный интервал времени. Сток показательных бассейнов трансформируется в гидрограф стока в расчетном створе по двухпараметрическим трансформационным функциям. Опыт исследований убедительно свидетельствует о том, что как для незарегулированных, так и для зарегулированных режимов горных рек поиск при разработке методик прогноза оказывается успешным, если используется опорная модель русловой трансформации и расчета стока через замыкающий створ, предложенная Г.П. Калининым и П.И. Милюковым (1). Ход стока во времени в расчетном створе определяется по трансформационным функциям (кривым руслового добегания)  $P(\tau; n)$ , которые описываются уравнением:

$$P = \frac{\Delta t}{\tau(n-1)} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{(n-1)} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [1]$$

где  $\tau$  - время руслового добегания и  $n$  - число характерных участков.

Расчет трансформации паводочной волны по мере ее движения в русловой сети осуществляется при заданном графике распределения притока или его характеристик.

Трансформация притока с учетом неравномерности его поступления во времени и пространстве рассчитывается по частным трансформационным функциям [2], [4], [6]. Учетом пространственно-временной неравномерности определяются относительно непродолжительные, с высоким пиком, паводки и длительные, в виде нескольких волн, следующих одна за другой в течении значительного периода. Расчет гидрографа стока по частным функциям  $P(\tau; n)$  не снимает необ-

ходимости учитывать сложные условия перемещения масс воды в пойменном русле. При выходе воды на пойму возникает необходимость разделения кривых объемов на отрезки с различным временем добегания. В этих случаях используются трансформационные функции [3]. Примерные границы изменения параметров функций в конкретном случае ставятся в зависимости от хода уровня воды в замыкающем створе.

Как видно из рис.1, распределение показательных водосборов в пределах всего бассейна реки недостаточно равномерно. В верхней части водосбора приток воды в русловую сеть можно характеризовать стоком двух показательных бассейнов: р. Мокранка до с. Русская Мокрая и р. Брустуранка до с. Лопухов; на нижнем участке, учитывается сток двух малых водосборов - р. Красна выше с. Красна и р. Лужанка выше с. Нересница.

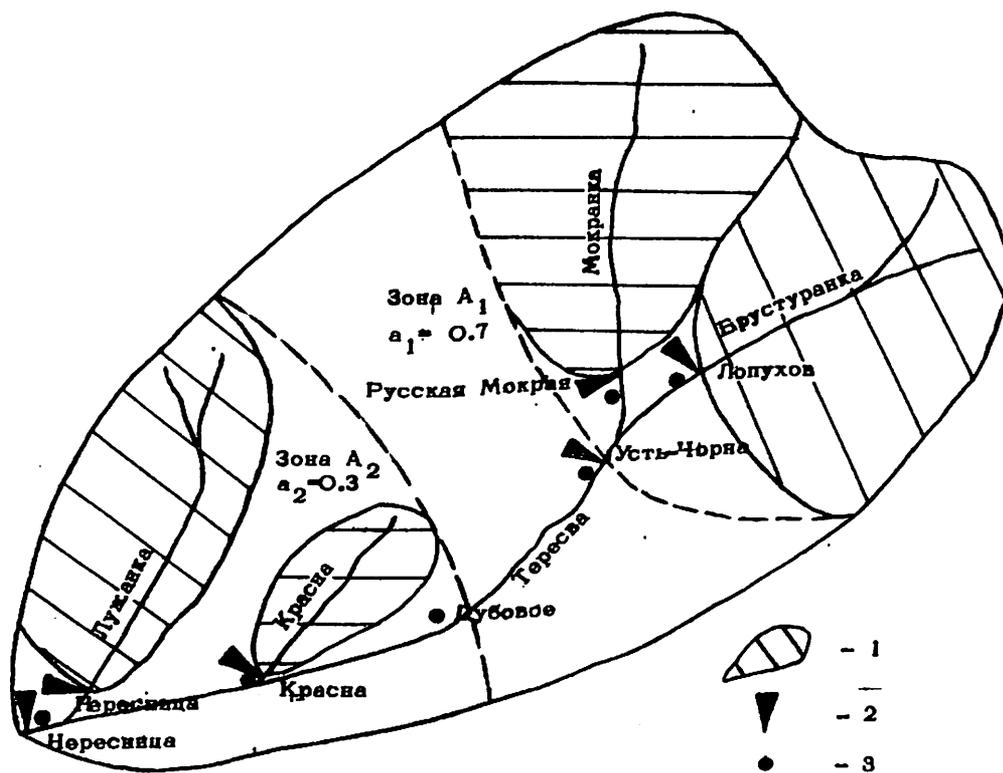


Рис.1. Схема расположения показательных бассейнов (1) на водосборе р. Тересвы до Нересницы; 2-пункты изучения стока воды; 3-пункты измерения осадков.

Средневзвешенные высоты бассейнов малых рек (табл.1) колеблются в значительных пределах от 770 (р. Лужанка) до 1 100 м (рр. Мокранка и Брустуранка) при средневзвешенной высоте бассейна 930 м. Принятые для расчетов гидрографа стока показательные бассейны по площади изменяются также в широких пределах. Наименьший водосбор р. Красна составляет 4,5% общей площади бассейна, два наибольшие из используемых - водосборы р. Брустуранки и р. Мокранки равны соответственно 23,4% и 19,5% общей площади бассейна р. Тересвы выше с. Нересницы.

Суммарная площадь бассейна малых рек составляет 671 км<sup>2</sup> или 61% от всей площади водосбора р. Тересвы до с.Нересницы.

Таблица 1.

Характеристика водосборов малых рек  
в бассейне р.Тересвы до Нересницы.

№.	Р е к а	Гидроствор	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Средняя высота водосбора, м	Отметки нуля графика, м	Начало изучения стока, год
1.	Мокранка	Руская-Мокрая	214	1 100	549.04	1946
2.	Брустуранка	Лопухов	257	1 100	591.03	1946
3.	Красна	Красна	51	880	418.68	1957
4.	Лужанка	Нересница	149	770	307.90	1956
5.	Тересва	Усть-Чорна	572	1 100	533.86	1948
6.	Тересва	Дубовое	757	1 000	381.60	1946
7.	Тересва	Нересница	1 100	930	298.38	1956

Для учета пространственной неравномерности водоотдачи в русловую сеть водосбор р.Тересвы выше Нересницы разделен на две зоны (рис.1), размеры которых установлены подбором. Методом последовательного приближения, исходя из наилучшей сходимости рассчитанных гидрографов паводков с фактическими, подобраны коэффициенты  $a_1=0,7$ ;  $a_2=0,3$  отражающие долю стока формирующуюся в верхней и нижней части всего водосбора р.Тересвы до Нересницы. Средний сток рек Мокранки и Брустуранки учитывает условия формирования гидрографа с 70% площади верхней части общего водосбора. Нижняя зона учитывает сток с 30% площади бассейна. Приток воды характеризуется стоком малых рек за полусуточные интервалы времени. Средний за полусуточный расчетный интервал расход воды р.Тересвы у Нересницы получим по уравнению:

$$y_{t+\Delta t} = a_1 \sum_{\tau_1=1}^{\tau_{1,M}} \bar{y}_B P_1(\tau_1; n_1) + a_2 \sum_{\tau_2=1}^{\tau_{2,M}} \bar{y}_H P_2(\tau_2; n_2) \quad [2]$$

где  $\bar{y}_B$  и  $\bar{y}_H$  - средний сток малых рек верхней и нижней зон за полусуточный расчетный интервал  $\Delta t$ ;  $P_1$  и  $P_2$  - двухпараметрические трансформационные функции.

Средний сток двух показательных бассейнов верхней зоны согласно уравнения [2] трансформируется по кривой  $P_1(\tau_1; n_1)$  с параметрами  $\tau_1=1$  и  $n_1=1$ . Долю стока  $y_{B,t+\Delta t}$  с верхней части водосбора получим по формуле:

$$y_{B,t+\Delta t} = 0,293\bar{y}_{B,t+\Delta t} + 0,258\bar{y}_{B,t} + 0,094\bar{y}_{B,t-\Delta t} + 0,035\bar{y}_{B,t-2\Delta t} + 0,020\bar{y}_{B,t-3\Delta t} \quad [3]$$

Приток воды в русловую нижней зоны водосбора трансформируется по кривой  $P_2(\tau_2; n_2)$  с параметрами  $\tau_2=0,5$  и  $n_2=1$ . Долю стока с нижней зоны водосбора  $y_{H,t+\Delta t}$  получим по формуле:

$$y_{H,t+\Delta t} = 0,160\bar{y}_{H,t+\Delta t} + 0,100\bar{y}_{H,t} + 0,030\bar{y}_{H,t-\Delta t} + 0,010\bar{y}_{H,t-2\Delta t} \quad [4]$$

Не всегда высокая степень естественного регулирования стока связана только с неодновременным подходом волны паводка к расчетному створу с разноудаленных частей водосбора при неравномерной водоотдаче бассейна. Требуется учитывать регулирующее влияние поймы реки

и русловой системы. Условия движения волны паводка р.Тересвы при высокой водности будет иным, чем при низкой. Лучшая сходимость рассчитанных и наблюдаемых гидрографов паводков будет обеспечена, если для расчета доли стока с верхней зоны будут использованы переменные трансформационные функции  $P(\tau; n)$  [3]. При расходах воды в замыкающем створе больше  $125 \text{ м}^3/\text{сек}$  / $U > 5 \text{ мм}$ / рекомендуется для расчета доли стока с верхней зоны использовать трансформационную функцию с параметрами  $\tau = 0,5$ ,  $n = 1$ .

Предлагаемая схема расчета может быть использована и при зарегулировании стока с части площади водосбора. Предположим, водохранилищем замыкается площадь водосбора  $570 \text{ км}^2$ , для прогнозирования притока воды в него используется трансформационная функция с параметрами  $\tau = 0,5$  и  $n = 1$ , по которой ведется расчет объема поступившей в водохранилище воды за полусуточные расчетные интервалы времени. Ход притока в русловую сеть характеризуется по среднему стоку малых рек Мокранки и Брустуранки. Среднесуточный приток воды в Тересвинское водохранилище ( $Y_{в\partial}$ ) на заданный расчетный интервал  $t + \Delta t$  получим по формуле:

$$Y_{в\partial, t+\Delta t} = 0,534\bar{Y}_{в, t+\Delta t} + 0,323Y_{в, t} + 0,090\bar{Y}_{в, t-\Delta t} + 0,033\bar{Y}_{в, t-2\Delta t} + 0,020\bar{Y}_{в, t-3\Delta t} \quad [5]$$

Рассчитанный сток р.Тересвы у Нересницы будет слагаться из трех частей. Доля стока зарегулированной части водосбора будет регламентироваться диспетчерским графиком и определяться по сбросным расходам воды из водохранилища. Волна паводка, сформировавшаяся за счет сбросных расходов, достигнет замыкающего створа за 6 часов. Долю стока в расчетном створе за шестичасовой расчетный интервал за счет сбросов воды из водохранилища ( $Q'_{в\partial}$ ) получим по формуле:

$$Q'_{в\partial, t+\Delta t} = 0,534Q_{в\partial, t+\Delta_1 t_1} + 0,323Q_{в\partial, t} + 0,090Q_{в\partial, t-\Delta_1 t_1} + 0,033Q_{в\partial, t-2\Delta_1 t_1} + 0,022Q_{в\partial, t-3\Delta_1 t_1} \quad [6]$$

Расчет доли стока с нижней зоны водосбора производится по формуле [4]. Для стока с незарегулированной части верхней зоны водосбора рассчитывается по формуле [3]. Коэффициент  $Q_1$  первого члена правой части уравнения [1] будет равен 0,2, уменьшается за счет зарегулированной части водосбора верхней зоны.

Рассмотренная модель позволяет вести расчеты экстремального стока за данный расчетный интервал. Ход максимального притока в русловую сеть водосбора характеризуется максимальным стоком за принятый полусуточный или суточный расчетный интервал. В нашем примере для трансформации максимального стока показательных бассейнов, обеспечивающей расчет хода максимального стока р.Тересвы у с.Нересница и притока воды в водохранилище, используются те же функции  $P(\tau; n)$ .

На спаде паводков в соответствии со схемой расчета и обеспечения регулирования низкого и высокого стока водохранилищем по той же схеме определяется минимальный сток за расчетный интервал.

Требуется привести в соответствие сток показательных бассейнов за отдельные расчетные интервалы со стоком в замыкающем створе. Для корректировки предвычисленных расходов воды используется метод коаксиальной графической корреляции. Для иллюстрации на рис.2 показана зависимость  $Y_{нр, t+1}(Y_{нр, t+1}; Y_{нр, t}; Y_{\phi, t})$ , на которой для корректировки предвычисленного по кривым  $P(\tau; n)$  на фазе подъема стока р.Тересвы у с.Нересница учитываются: трансформированный сток показательных бассейнов на период заблаговременности прогноза  $Y_{нр, t+1}$  и в момент выпуска прогноза  $Y_{нр, t}$ , а также фактический сток в замыкающем створе в момент выпуска прогноза  $Y_{\phi, t}$ . На фазе спада паводка в зависимостях учитываются эти же

предикторы. Графическую корреляцию можно заменить аналитическим выражением, что дает возможность при выпуске прогнозов использовать ЭВМ. Сток в замыкающем створе получим по уравнению:

$$y_{np,t+1} = 0,2(3,5y_{mp,t+1} + 0,017y_{mp,t}^2 - 3,104y_{mp,t} + 0,744) + 0,011y_{\phi,t}^2 + 0,802y_{\phi,t} + 0,495. \quad [7]$$

Для

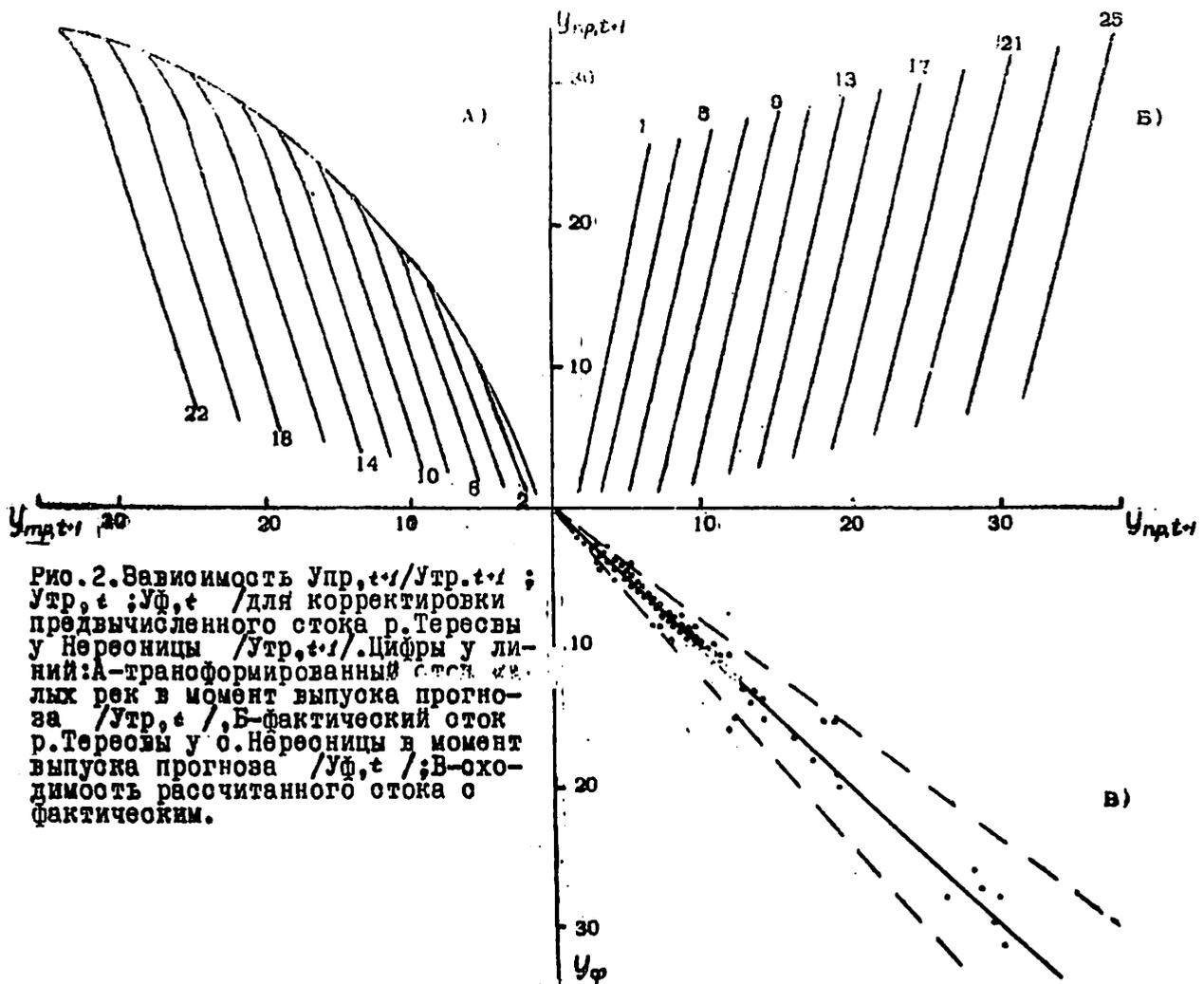


Рис. 2. Зависимость  $U_{np,t+1}/U_{tr,t+1}$ ;  $U_{tr,t+1}/U_{\phi,t+1}$  для корректировки предвычисленного стока р. Тересвы у Нересницы  $U_{tr,t+1}$ . Цифры у линий: А - трансформированный сток малых рек в момент выпуска прогноза  $U_{tr,t+1}$ ; Б - фактический сток р. Тересвы у о. Нересницы в момент выпуска прогноза  $U_{\phi,t+1}$ ; В - сходимость рассчитанного стока с фактическим.

Для предвычисления объема стока малых рек  $U$  на период заблаговременности прогноза используется зависимость  $U(\sum x; U_{np})$ , по которой также устанавливается паводкоопасное положение. Объем стока ставится в зависимость от осадков  $x$ , суммирование которых производится от даты  $t$  - времени наступления минимального предпаводочного стока  $U_{np}$  с опережением на время бассейнового добега  $T$ . Такие зависимости являются территориально общими для значительных гидролого-геоморфологических регионов (4). Предпаводочный сток характеризует водопоглотительную способность бассейна, осадки учитываются по метеорологическому прогнозу. Установлены следующие пределы: осадков не ожидается -0, осадки ожидается слабые -5мм,

умеренные - 15 мм, значительные - 30 мм, сильные - 60 мм.

Рассмотренная схема прогноза хода паводочного стока обеспечивает установление режима наполнения и сработку комплексных водохранилищ в горной местности и ливнеопасных районах при регулировании ими высокого и низкого стока.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Калинин Г.П.,  
Милюков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс. Тр. ЦИП, 1958, вып.66.
2. Левин А.Г. Учет неравномерности и водоотдачи бассейна с помощью частных кривых добегания. - Метеорология и Гидрология, №8, 1966.
3. Лыло В.М. Комплексный метод прогноза дождевых паводков. Тр. ДВНИГМИ, 1968, вып.29.
4. Лыло В.М.,  
Жидкова Л.В. Прогноз суточного стока горных рек Карпат на основе учета пространственной неравномерности водоотдачи бассейна. Тр. УкрНИГМИ, 1973, вып.123.
5. Огиевский А.В. Бассейны-индикаторы. - Тр. НИУ ГУГМС, сер.IV, вып.26, Гидрометеоиздат, 1947.
6. Павленко Г.В. Предвычисление гидрографов стока Днестра с использованием частных кривых добегания. - Тр. УкрНИГМИ, 1970, вып.97.

### 3. DISKUSSION

Anmerkung:

Leider kann der 1. Teil dieser Diskussion hier nicht wiedergegeben werden, da einige entscheidende Texte von den Autoren nicht mehr zur Verfügung gestellt werden konnten. Bedauerlicherweise ist auch die Tonbandaufzeichnung in dieser Diskussion gestört.

Burz:

Zum Vortrag von Simo habe ich 4 Fragen:

1. Welche Größen beinhaltet der komplexe Wärmefaktor außer der genannten maximalen und mittleren Lufttemperatur?
2. Nach welchen Methoden wurde der Wassergehalt der Schneedecke ermittelt?
3. Nach welchen Methoden wird die Schneedecke eines größeren Niederschlagsgebietes ermittelt?
4. Ist die Strahlung, bzw. Wärmebilanz in das Modell einbezogen worden?

Simo:

Zu 1.: Wir haben keine eigenen Untersuchungen und Berechnungen in dieser Richtung gemacht. Die durchschnittlichen maximalen und minimalen Lufttemperaturen dienten nur als Kriterium für die Bewertung der Grundform der gefallenen Niederschläge.

Was den Wärmefaktor betrifft, so ging ich zwar von einem durch ausländische Angaben begründeten Durchschnitt ( $\varphi = 2 \text{ mm/Grad-Tag}$ ) aus, aber ich wollte mit den gewählten Werten um diesen Durchschnitt das Regime des Wärmefaktors in der Winter-Frühlingsperiode ausdrücken.

Seine Werte, wie sie das in der Berechnung verwendete Schema darstellt, sind eine extreme Vereinfachung der Wirklichkeit; dabei gibt es keine Möglichkeit, sich an die realen Werte der natürlichen Bedingungen anzulehnen.

Zu 2.: Im letzten Jahrzehnt organisierten meine Mitarbeiter im Institut für Hydrologie und Hydraulik der Slowakischen Akademie der Wissenschaften ein Programm für die direkte Messung des Wasseräquivalentes der Schneedecke in einigen Flußgebieten, z.B. der Orava usw. (Nordslowakei). Die Messungen wurden methodisch verbessert durch repräsentativere Linienmessungen und durch ein genaueres Meßgerät.

Zu 3.: Im Flußgebiet der Orava (bis zu der Talsperre Orava,  $F = \text{ca. } 1180 \text{ km}^2$ ) wurden die direkten Messungen in einem speziellen Stationsnetz durchgeführt unter Berücksichtigung einer richtigen Flächenverteilung der Stationen in den Höhenzonen und deren Exposition. Weiterhin wurde die Verteilung der Stationen auf bewaldete und unbewaldete Gebiete beachtet. Mit Hilfe der Berechnung der durchschnittlichen Wasservorräte in der Schneedecke in den einzelnen Höhenzonen wurden die Wasservorräte für das ganze Flußgebiet ermittelt.

Zu 4.: Die Frage, ob die Strahlung bzw. Wärmebilanz in das Modell einbezogen wurde, muß ich verneinen. Diese komplizierten Berechnungen haben wir auch in vereinfachter Form nicht gemacht.

Burz:

Auf welche Parameter bezieht sich im Beitrag von Lylo und Shidkova das Niederschlags-Abfluß-Modell; beschränkt es sich auf den Abflußkoeffizienten oder werden auch andere Größen der Wasserbilanz einbezogen?

Schtscherbak:

Für die Vorausberechnung der Abflußsumme kleiner Flüsse für den Vorhersagezeitraum nutzt man die Abhängigkeit der Menge des Abflusses von der Summe der Niederschläge und der Feuchtigkeit des Beckens. Als Feuch-

tigkeitscharakteristik nimmt man den minimalen Wasserdurchfluß vor dem Hochwasser an, und zwar als indirekten Index für den Abflußverlust durch die Infiltration. Andere Größen der Wasserbilanz (Verdunstung u.ä.) werden nicht berücksichtigt.

Parschin:

Im Zusammenhang damit, daß zum Vortrag von Herrn Simo viele Fragen gestellt wurden, möchte ich sagen, daß der Untersuchung des Schnees in den Bergen in der UdSSR große Bedeutung beigemessen wird. Seit 7 Jahren arbeitet z.B. eine spezielle Expeditionsgruppe in einem Gebirgseinzugsgebiet in Mittelasien. Es wurde sehr interessantes Material über die Schneevertelung, die Verdunstung, die Schneeschmelze u.a. erarbeitet. Aufgrund der Ergebnisse dieser Expedition kann von seiten der UdSSR in Zukunft ein entsprechender Bericht erstellt werden.

Sodann habe ich noch eine Frage: Hier werden im wesentlichen Berechnungsschemen und Modelle erörtert, von denen es bis zur Hochwasservorhersage noch ziemlich weit ist. Es werden Niederschlagsvorhersagen gebraucht. Vielleicht könnte jemand von den Vortragenden sagen, wie die Wetterprognosen für die Hochwasservorhersage verwendet werden?

Glasel:

In Österreich werden Niederschlagsprognosen für die Abflußvorhersage nicht verwendet. Für verschiedene ausgewählte Flüsse und für bestimmte Zwecke (z.B. Kraftwerke) werden allerdings die gefallenen Niederschläge in die zuständigen Zentralstellen fernübertragen und so eine verlässliche und etwas längerfristige Vorhersage von Hochwasserwarnungen möglich.

Attmannspacher:

Als Meteorologe fühle ich mich angesprochen. Eine Vorhersage für kleine und mittlere Einzugsgebiete ist mit der numerischen Wettervorhersage heute nicht möglich. Eine gewisse Vorhersage ist auf statistischem Wege mit ausreichenden Radarflächenniederschlagskarten möglich. Die Vorhersage wird dann von den aktuellen Radarmessungen laufend verbessert.

Parschin:

Zur Information: In der UdSSR werden die Wetterprognosen für 1 - 3 Tage zu Vorhersagen von Regenhochwasser ausgewertet, und das Ergebnis ist nicht schlecht. Wichtig ist es, eine Prognose nicht beliebiger, sondern große Niederschläge zu haben, die zu Überschwemmungen führen. Solche Niederschläge bilden sich durch Prozesse von gewaltigen Ausmaßen, durch riesige Zyklonen, deren Ortsveränderung die Synoptiker in der Gegenwart nicht schlecht prognostizieren. Deswegen ist eine enge Verbindung und Zusammenarbeit von Hydrologen und Synoptikern sowie die Nutzung von Wettervorhersagen bei der Entstehung gefährlicher Hochwässer unumgänglich.

Kunsch:

Für eine längerfristige Vorhersage wäre es zweckmäßig, die Niederschlagsprognosen zu beachten. Leider ist dieses Problem - besonders unter den Bedingungen Zentraleuropas - sehr kompliziert. Teilweise kann man dieses Problem auf der Grundlage hydro-synoptischer Methoden lösen.

Was das tschechoslowakische Territorium betrifft, so kann man sagen, daß es ungefähr 4 - 5 synoptische Situationen sind, die die Gefahr von gewaltigen Niederschlägen mit sich bringen.

### 3. Д И С К У С С И Я

Примечание:

К сожалению здесь не опубликуется первая часть этой дискуссии, так как некоторые важные тексты не были доставлены авторами и воспроизведение звукозаписи на магнитофоне было возмущено.

Бурц:

К докладу господина Шимо у меня имеется 4 вопроса:

1. Какие величины содержит комплексный тепловой фактор кроме названных максимальной и средней температуры воздуха?
2. По каким методам определялось содержание воды в снежном покрове?
3. По каким методам определяется снежный покров большого водосборного бассейна?
4. Включалось ли в модель излучение, т.е. тепловой баланс?

Шимо:

К 1.: Мы не сделали в этом направлении никаких собственных исследований и расчетов. Средние, максимальные и минимальные температуры воздуха служили лишь в качестве критерия для оценки основной формы выпавших осадков.

Что касается теплового фактора, то хотя я и исходил из обоснованного зарубежными данными усреднения ( $\bar{U} = 2$  мм/градус-день), но я хотел с выбранными значениями около этого усреднения выразить режим теплового фактора в зимне-весеннем периоде.

Его значения, как они представлены в примененной при расчете схеме, являются экстремальным упрощением действительности; при этом не возникает никакой возможности прислониться к реальным значениям естественных условий.

К 2.: В последнем десятилетии мои сотрудники организовали в институте гидрологии и гидравлики Словацкой академии наук программу для непосредственного измерения водного эквивалента снежному покрову в некоторых речных бассейнах, например, в Ораве и т.д. (Северная Словакия). Эти измерения были методически улучшены посредством более репрезентативных линейных измерений и посредством более точного измерительного прибора.

К 3.: В речном бассейне Оравы (вплоть до плотины Орава, пл. = пригл.  $1\ 180\ \text{км}^2$ ) были проведены непосредственные измерения в одной специальной сетке станций, принимая во внимание правильность распределения станций по территории на возвышенных зонах и их экспозиции. Затем обращалось внимание на распределение станций по лесным и безлесным районам. С помощью подсчета среднего запаса воды в снежном покрове отдельных возвышенных зон был определен запас воды для всего речного бассейна.

К 4.: На вопрос о том, включалось ли изучение, т.е. тепловой баланс, в модель я должен дать отрицательный ответ. Эти сложные расчеты нами не были проведены и в упрощенной форме.

Бурц:

На какие параметры ссылается в модели Лило и Жидковой модель стока осадков, ограничивается ли она коэффициентом стока или в модель вошли и другие величины водного баланса?

Щербак:

Для предвычисления объема стока малых рек на период заблаговременности используется зависимость величины стока от суммы осадков и увлажнения бассейна. В качестве характеристики увлажнения принимается минимальный предпаводочный расход воды, как косвенный показатель потерь стока на инфильтрацию. Другие составляющие водного баланса (испарение и т.д.) не учитываются.

Паршин:

В связи с тем, что по докладу г-на Шимо было сделано много вопросов, я хотел бы сказать, что в СССР придается большое значение изучению снега в горах. В частности, 7 лет работает специальная экспедиция в опытном горном бассейне в Средней Азии. Получены очень интересные материалы о распределении снега, испарении, снеготаянии и т.д. СССР может по результатам этой экспедиции сделать соответствующий доклад в дальнейшем.

Вопрос: Здесь рассматриваются в основном расчетные схемы, модели, от которых до прогнозов паводков дистанция немалая. Нужен прогноз осадков. Может быть кто-либо из докладчиков скажет, как учитываются прогнозы погоды при прогнозе паводков?

Глазль:

В Австрии прогнозы осадков не используются для предсказания стока. Для различных выбранных рек и для определенных целей (напр., энергетические установки) о выпавших осадках, разумеется, сообщается с помощью дистанционной передачи в компетентные центральные инстанции и таким образом делается возможным надежный и несколько более долгосрочный прогноз угрозы паводков.

Атманнспахер:

Как метеоролог я чувствую себя затронутым. Прогноз для малых и средних бассейнов с помощью числового предсказания погоды в настоящее время невозможен. Некоторое определенное предсказание возможно статистическим путем при достаточных радарных территориальных карт атмосферных осадков. Затем прогноз непрерывно улучшается актуальными радарными измерениями.

Паршин:

Информация: В СССР используются прогнозы погоды на 1-3 дня для прогнозов дождевых паводков и получается неплохо. Важно иметь прогноз не любых осадков, а больших осадков, которые приводят к наводнениям. Такие осадки формируются крупномасштабными процессами, огромными циклонами, перемещение которых в настоящее время синоптики прогнозируют неплохо. Поэтому необходима тесная связь между гидрологами и синоптиками и использование прогнозов погоды при формировании опасных паводков.

Кунш:

Для продолжения заблаговременности прогноза было бы целесообразным учитывать прогнозируемые осадки. К сожалению, эта проблема, особенно в условиях центральной Европы, очень сложна. Частично можно решить эту проблему на основе гидросиноптических методов.

В отношении чехословацкой территории можно сказать, что приблизительно 4-5 синоптические ситуации являются опасными для крупных осадков.

VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN HYDROLOGISCHER VORHERSAGEMODELLE

J. Немеч

Сравнительные исследования гидрологических прогнозируемых моделей

Немеч Й.

In der jüngsten Vergangenheit wurde an führenden hydrologischen Instituten der ganzen Welt, mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung, eine Vielzahl mathematischer Modelle für die hydrologische Vorhersage entwickelt, geprüft und angewendet. Die Hydrologen an Hochwasservorhersagestellen, die nicht an dieser Entwicklung beteiligt waren, stehen deshalb bei der Einrichtung neuer Vorhersagesysteme oft vor der Frage: Welches sind die Vorteile und Nachteile, und welche mathematische Vorstellung sollte, unter den spezifischen örtlichen Bedingungen, aus der Fülle der in der Fachliteratur sich bietenden Modelle ausgewählt werden? Ein von der Meteorologischen Weltorganisation (WMO) zwischen 1968 und 1975 ausgeführtes Projekt zur vergleichenden Untersuchung von in der hydrologischen Vorhersage verwendeten mathematischen Modellen stellt einen wichtigen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage. Es waren Ziele des Projektes: (1) ein Inventar der hydrologischen Modelle, die mit Hilfe der EDV zur kurzfristigen Abfluvvorhersage verwendet werden, zu bereiten, und (2) diese Modelle untereinander zu vergleichen, um unter Berücksichtigung spezifischer örtlicher Bedingungen und der Genauigkeitsanforderungen bei verschiedenen Vorhersagelagen, Anleitung zur Wahl der besser geeigneten Modelle zu bieten. Es wurde hingegen nicht versucht, ein einziges unter allen Bedingungen passendes Modell zu ermitteln.

Die Untersuchung hat 10 Modelle aus 7 Ländern umfaßt (s. Tab. 1). Zur Vergleichsübung wurden Abfluß-, Niederschlags- und andere relevante meteorologische Daten aus sechs klimatisch und geographisch unterschiedlichen Einzugsgebieten in Australien, Japan, Kamerun, Thailand, USA und UdSSR verwendet. Ein gemeinsamer 6-jähriger Zeitraum wurde für die Eichung, ein darauffolgender 2-jähriger Zeitraum für die Prüfung der Ergebnisse bestimmt. Die Eigentümer der Modelle erhielten alle beobachteten Daten für die 6-jährige Eichungszeit. Für den darauffolgenden 2-jährigen Zeitraum zur Prüfung der Ergebnisse wurden hingegen nur Eingabedaten (Niederschlagsdaten und wenn vorhanden Bodenfeuchtigkeit, Temperatur, usw.) geliefert; die dazugehörigen beobachteten Abflußdaten wurden im WMO-Sekretariat verwahrt. Mit Hilfe der 6-jährigen Datenreihe haben die Eigentümer der jeweiligen Modelle die erforderlichen Eichungsparameter bestimmt. Anhand der geeichten Modelle wurden dann die beobachteten Eingabedaten der 2-jährigen Reihen zur Erzeugung des simulierten Abflusses verwendet. Die simulierten Abflußwerte, sowohl für den Eich- als auch für den Prüfungszeitraum, wurden dann durch die WMO ausgewertet und mit den beobachteten Werten verglichen. Die Modelleigentümer hatten vorher ihr Einverständnis zu den Kriterien für den Vergleich der Ergebnisse gegeben.

Es wurden vier graphische und vier numerische Prüfungskriterien verwendet. Zum graphischen Vergleich der simulierten und beobachteten Abflüsse dienten: (1) die Ganglinien; (2) die Massenlinie ("double mass plot"); (3) die Dauerlinien (nur für den Prüfungszeitraum); und (4) die graphische Darstellung der höchsten monatlichen Abflüsse für den Prüfungszeitraum. Die numerischen Prüfungskriterien der Abflußvariabel waren: (1) der Variationskoeffizient der Fehler; (2) der Quotient der relativen Fehler zu den Mittelwerten; (3) der Quotient der absoluten Fehler zu den Mittelwerten; und (4) der Mittelwert. Die Prüfungskriterien wurden auf den mittleren Tagesabfluß, monatliche höchste Tagesabflüsse, monatliche Abflußmengen, und mittlere tägliche Abflüsse bei Niedrigwasser angewendet. Zusätzlich wurde auch ein "Phasen-Koeffizient" zur Prüfung der zeitlichen Verschiebung und ein "Persistenz-Koeffizient" zur Prüfung der Richtung des Fehlers ermittelt.

Die Aufschlüsse, die das Projekt aufgrund der Prüfung und Vergleichung der Modelle ergab, sollten den mit der praktischen hydrologischen Vorhersage beauftragten Stellen bei der Wahl eines geeigneten Modelles behilflich sein. Ein erstes wichtiges Ergebnis ist, daß für Einzugsgebiete im humiden Klimabereich (hohe Bodenfeuchtigkeit) so gut wie alle Modelle zufriedenstellende Ergebnisse bringen. Infolgedessen sollte unter

diesen Bedingungen ein einfaches, unkompliziertes Modell gewählt werden. Im semiariden und ariden Klimabereich hingegen ist große Sorgfalt bei der Wahl des Modelles geboten, denn insbesondere bei langanhaltenden trockenen Zeitreihen erfordert die Abflusssimulation einen komplizierten Modellaufbau. Das Projekt bestätigte die Tatsache, daß auch in den Ländern, die über einen gut ausgebauten hydrologischen Dienst verfügen, die Qualität der vorhandenen Datengrundlage oft ungenügend ist. Ausmaß und Qualität der Datengrundlage bestimmen gleichzeitig die Grenzen der Anwendung mathematischer Modelle in der Hydrologie.

Die von der WMO auf diesem Gebiet eingeleitete Arbeit soll in der Zukunft in zwei Hauptrichtungen weitergeführt werden: einerseits durch ein Projekt zur vergleichenden Untersuchung von Schneeschmelz/Abflußmodellen, andererseits durch Unterstützung der Bemühungen in den verschiedenen Ländern zur weiteren Entwicklung und Ausbau der Systeme zur Sammlung hydrologischer Daten. Im Endausbau sollten Vorhersagesysteme als "on-the-line" Systeme gestaltet werden, in denen sammeln, Übertragen, auswerten und modellieren der Daten lückenlos zusammenhängen. Die Möglichkeit, derartige Vorhersagesysteme einzurichten, ist heute in Teilen des Donaubeckens mit Sicherheit gegeben.

TABELLE I

Im Projekt verglichene Modelle und Ursprung der dazu verwendeten Daten

Name des Modelles (Abkürzung)	Name und Anschrift des Eigentümers	Ursprung der Daten					
		<i>Bird Creek U.S.A. 2344 km<sup>2</sup></i>	<i>Bikin River U.S.S.R. 13100 km<sup>2</sup></i>	<i>Wollombi Brook Australien 1580 km<sup>2</sup></i>	<i>Kizu River Japan 1445 km<sup>2</sup></i>	<i>Sanaga River Cameroun 131500 km<sup>2</sup></i>	<i>Nam Mue River Thailand 104000 km<sup>2</sup></i>
Bureau of Meteorology Model (CBM)	Bureau of Meteorology, P.O. Box 1289 K, Melbourne, Vic. 3001, Australia	•	•	•	•		
Girard I Model	ORSTOM, 19, rue Eugène Carrière, 75018 Paris, France	•	•				
Serial Storage Type Model (Tank I)	National Research Centre for Disaster Prevention, 1 Ginza Higashi 6, Chuo-ku, Tokyo, Japan	•	•	•	•	•	•
Serial Storage Type Model (Tank II)	Ditto	•		•			
The Flood Forecasting Model (IMII2-SSVP)	Institute of Meteorology and Hydrology Şos. Bucureşti-Ploieşti 97, Bucarest, Romania	•	•				
Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model (SSARR)	Corps of Engineers, Portland, Oregon, U.S.A.	•	•	•	•	•	•
National Weather Service Hydrologic Model (NWSII)	National Weather Service, Silver Spring, Maryland, U.S.A.	•		•	•	•	
Sacramento River Forecast Center Hydrologic Model (SRFCH)	National Weather Service River Forecast Center, Sacramento, California U.S.A.	•		•	•	•	
Rainfall Runoff Model of the Hydrometeorological Centre of the U.S.S.R. (HIMC)	Hydrometeorological Centre of the U.S.S.R., Bolshevistskaya 13, Moscow 123 376, U.S.S.R.	•	•	•			
Constrained Linear System Model (CLS)	Hydraulic Institute of Pavia University and IBM Pisa Scientific Centre, Italy	o	•	•	•	•	o

o = Ergebnisse im WMO-Sekretariat nach der Konferenz (1974) erhalten, d.h. nach dem die zwei-jährigen Datenreihen für Prüfung der Ergebnisse den Modelleigentümern bekannt waren.

КРАТКОСРОЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ НА ПРИТОЧНОМ  
УЧАСТКЕ РЕКИ ДУНАЙ

Анджелич М.

KURZFRISTIGE ABFLUSSVORHERSAGE FOR  
EINEN JUGOSLAWISCHEN DONAUABSCHNITT

Andželič M.

Резюме

В статье рассматриваются две линейные и одна нелинейная регрессионные модели с переменными коэффициентами, и возможность их применения для краткосрочных прогнозов на приточном участке реки Дунай.

Полученные результаты показывают, что уравнение регрессии с хорошо выбранными переменными, в которых коэффициенты регрессии меняются в функции выходного расхода, может быть одной из удовлетворяющих моделей для оперативного выпуска краткосрочных прогнозов.

Zusammenfassung

In diesem Bericht werden ein nichtlineares und zwei lineare Regressions-Modelle mit veränderlichen Koeffizienten und Verwendungsmöglichkeiten für kurzfristige Vorhersagen an der Donau unter Berücksichtigung von seitlichen Zuflüssen dargestellt.

Die erhaltenen Ergebnisse zeigen, daß die Regressionsgleichung mit angemessen ausgewählten Veränderlichen (Regressionskoeffizient verändert sich nach dem Ausgangsabfluß) ein günstiges Modell für die kurzfristige Vorhersage an dem angegebenen Flußabschnitt an der Donau sein kann.

Введение

Краткосрочные прогнозы расходов на приточном участке реки, всегда представляют собой интересный вопрос, так как применение любого метода связано с учетом влияния притока, часто значительно изменяющего режим течения. На югославском секторе Дуная, на участке, на котором Дунай принимает правый приток Драву (рис.1), анализированы линейные и нелинейные регрессионные модели с переменными коэффициентами регрессий, для краткосрочного прогноза на в.п. Богоево с заблаговременностью на одни, полтора и двое суток.



Рис.1 Схема приточного участка р. Дунай с водомерными постами, которые служат как основа для прогноза на в.п. Богоево.

На этом участке сначала анализировано линейное регрессионное уравнение с переменными коэффициентами типа:

$$Q_{t+\Delta t} = a_{12} Q_{12t} + a_0 Q_t \quad [1]$$

где  $Q_{t+\Delta t}$ ,  $Q_{12t}$ ,  $Q_t$  обозначения как на рис.1, а  $a_{12}$  и  $a_0$  - регрессионные коэффициенты, которые не являются постоянными, а функциями расходов у Богоева -  $Q_t$ .

Такая модель предложена в статье Д. Янковича (1), где показано, что такой тип регрессионного уравнения, при выборе соответственных переменных, по сути не отличается от известного метода Калинина-Милюкова (2) для расчета движения паводочной волны в открытых руслах, за исключением того, что здесь нет ограничений относящихся к длине участка.

Известно, между тем, что метод Калинина-Милюкова а, следовательно, и регрессионное уравнение [1] лучшие результаты дает для безприточного участка. Поэтому, на рассматриваемом участке, альтернативно анализировано регрессионное уравнение

$$Q_{t+\Delta t} = a_1 Q_{1t} + a_2 Q_{2t} + a Q_t \quad [2]$$

в котором регрессионные коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a$ , также функции расхода на в.п. Богоево -  $Q_t$ ;  $a_1 = f_1(Q_t)$ ,  $a_2 = f_2(Q_t)$  и  $a = f(Q_t)$ .

Обозначения те же, что на рис.1.

В конце анализирована возможность улучшения линейных регрессионных прогностических зависимостей [1] и [2], применением поступка определения нелинейных регрессионных связей через нормализованные значения переменных, который предложен Г.А.Алексеевым (3).

#### Способ подготовки и обработки данных

Для определения линейных регрессионных уравнений [1] и [2] с переменными коэффициентами, на рассматриваемом приточном участке Бездан-Д.Михоляц-Богоево, необходимые данные были подготовлены следующим образом:

Для всех паводков, наблюдаемых в периоде с 1931 - 1970 г.г., на выходном створе Богоево раньше выбраны 15 различных расходов в интервале изменения от  $Q_t \text{ const} = 2\,000 (\text{м}^3/\text{сек})$  до  $Q_t \text{ const} = 7\,000 (\text{м}^3/\text{сек})$ . Взятые следующие постоянные расходы: 2 000, 2 500, 3 000, 3 500, 4 000, 4 250, 4 500, 4 750, 5 000, 5 250, 5 500, 5 750, 6 000, 6 500, 7 000 ( $\text{м}^3/\text{сек}$ ). Для каждого паводка, при закрепленном значении расхода на выходном створе  $Q_t = \text{const}$ , собраны данные  $Q_{t+\Delta t}$  ( $\Delta t = 1$  сут.,  $\Delta t = 1,5$  сут.  $\Delta t = 2$  сут.),  $Q_{1t}$  и  $Q_{2t}$  и то для фазы спада (рис.2).

Таким способом сформировано 15 выборок наблюдаемых значений зависимых  $Q_t$ ,  $Q_{1t}$ ,  $Q_{2t}$  от переменных. Объем данных 1638 для всех 15 выборок, причем меньше всего данных получено в 15-ой выборке (22) при  $Q_t \text{ const} = 7\,000 (\text{м}^3/\text{сек})$ , а больше всего (246) в третьей при  $Q_t \text{ const} = 3\,000 (\text{м}^3/\text{сек})$ .

Таким способом сформированные входные данные являются основой для всех численных расчетов и визуализов.

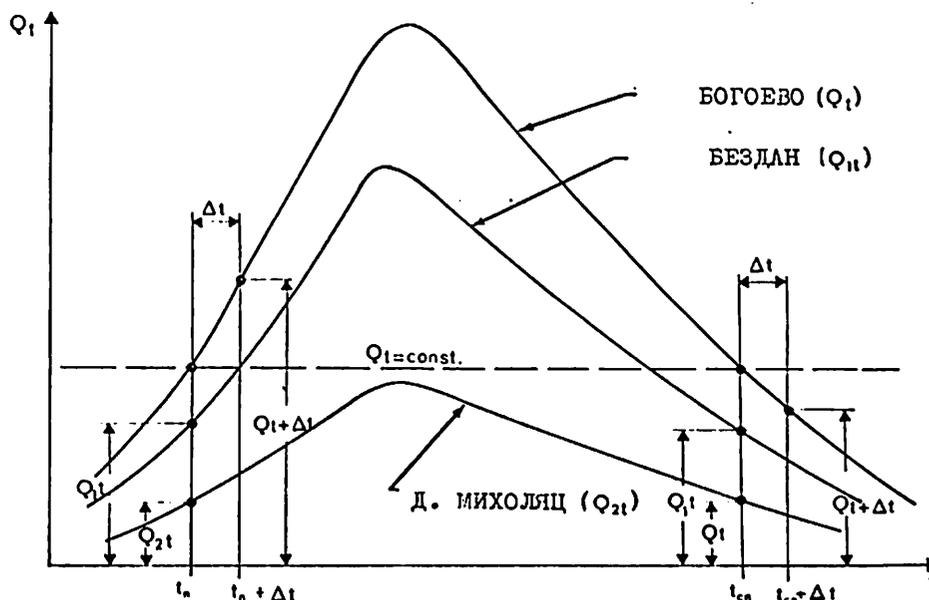


Рис.2. Наблюдаемые гидрографы на выходном створе (Богоево) и на входных створах (Бездан, Д.Михоляц) с обозначением способа формирования "наблюдаемых" - входных данных.

Вычисление регрессионных коэффициентов уравнений [1] и [2] и всех остальных статистических параметров как: коэффициент множественной корреляции  $-R$ , среднее квадратичное отклонение  $-S$ , средняя квадратичная ошибка коэффициента множественной корреляции  $-\sigma_R$  и коэффициента регрессии  $-\sigma_{a_i}$ , осуществлено для всех 15 выборок, т.е. для 15 различных выходных расходов. Расчет производился на ЭВМ IBM 360/44. Программирование осуществлено по Крамеровской формуле для множественного линейного корреляционного анализа через корреляционные матрицы. Сам этот способ подробно описывается в литературе (3, 4, 5, 6, 7).

#### Анализ полученных результатов

В таблицах 1 и 2 даются коэффициенты регрессии  $a_0$  и  $a_{12}$  для уравнения [1], а также коэффициенты регрессии  $a$ ,  $a_1$ , и  $a_2$  для уравнения [2], полученных для 15 постоянных выходных расходов у р.п. Богоево, для  $\Delta t = 1 \text{сут.}$ ,  $\Delta t = 1,5 \text{сут.}$  и  $\Delta t = 2 \text{сут.}$  На основе этих данных очевидно, что регрессионные коэффициенты меняются с изменением выходного расхода; следовательно, можно восстановить связь между коэффициентами регрессии с выходным расходом  $-Q_t$ . Этим улучшается классическая регрессионная модель; кроме того предложенная регрессионная модель имеет и физическое объяснение как в случае уравнения [1] так и в случае уравнения [2]. Именно, у гидрологическо-гидравлических методов и расплывания паводочной волны, самое важное определить динамическое уравнение для рассматриваемого участка. Это уравнение расчета движения заменяется кривой объемов в функции выходного расхода, что в свою очередь указывает на тот факт, что закон движения паводочной волны меняется с изменением объема на участке, т.е., посредственно, с изменением выходного расхода. Поэтому и регрессионные модели, которые рассматриваются для решения таких проблем, а коэффициенты которых меняются в зависимости от выходного расхода, имеют свое физическое обоснование и могут быть успешно использованы. Их применение особенно полезно на приточных участках, для которых, часто, из-за недостатка данных измерений, применение гидравлических методов является невозможным, или дает неудовлетворительные результаты.

ТАБЛИЦА 1  
 ПЕРЕСМОТР КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГРЕССИИ  $a_0$  И  $a_{12}$  ПОЛУЧЕННЫХ  
 ДЛЯ УРАВНЕНИЯ /1/, ДЛЯ  $\Delta t = 1, 1,5$  И 2 СУТОК

$Q_t = \text{const.}$ м <sup>3</sup> /сек	$\Delta t = 1$ СУТ.		$\Delta t = 1,5$ СУТ.		$\Delta t = 2$ СУТ.	
	$a_0$	$a_{12}$	$a_0$	$a_{12}$	$a_0$	$a_{12}$
2000	0,208	0,813	-0,065	1,099	-0,290	1,335
2500	0,404	0,623	0,132	0,882	-0,040	1,085
3000	0,296	0,718	0,014	1,002	-0,211	1,235
3500	0,419	0,587	0,174	0,831	-0,050	1,054
4000	0,553	0,444	0,364	0,633	0,182	0,814
4250	0,589	0,409	0,411	0,585	0,252	0,744
4500	0,618	0,380	0,434	0,563	0,243	0,754
4750	0,625	0,377	0,446	0,557	0,276	0,728
5000	0,608	0,396	0,427	0,580	0,263	0,746
5250	0,611	0,396	0,428	0,582	0,231	0,784
5500	0,661	0,351	0,504	0,510	0,351	0,667
5750	0,599	0,416	0,423	0,598	0,251	0,774
6000	0,686	0,324	0,522	0,492	0,363	0,655
6500	0,675	0,344	0,482	0,545	0,313	0,728
7000	0,668	0,353	0,511	0,518	0,344	0,694

ТАБЛИЦА 2  
 ПЕРЕСМОТР КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГРЕССИИ  $a$ ,  $a_1$  И  $a_2$  ПОЛУ-  
 ЧЕННЫХ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ /2/, ДЛЯ  $\Delta t = 1, 1,5$  И 2 СУТОК

$Q_t = \text{const.}$ м <sup>3</sup> /сек	$\Delta t = 1$ СУТ.			$\Delta t = 1,5$ СУТ.			$\Delta t = 2$ СУТ.		
	$a$	$a_1$	$a_2$	$a$	$a_1$	$a_2$	$a$	$a_1$	$a_2$
2000	0,024	1,077	0,691	-0,305	1,440	0,942	-0,557	1,719	1,158
2500	-0,020	1,102	0,776	-0,383	1,493	1,084	-0,665	1,783	1,343
3000	0,075	0,999	0,678	-0,237	1,315	0,982	-0,548	1,646	1,194
3500	0,417	0,599	0,540	0,176	0,841	0,763	-0,044	1,064	0,958
4000	0,538	0,471	0,402	0,345	0,666	0,582	0,161	0,849	0,759
4250	0,570	0,436	0,378	0,384	0,626	0,535	0,210	0,805	0,675
4500	0,610	0,395	0,350	0,421	0,586	0,519	0,226	0,782	0,701
4750	0,609	0,411	0,320	0,419	0,607	0,475	0,241	0,791	0,623
5000	0,583	0,437	0,341	0,389	0,639	0,504	0,215	0,822	0,648
5250	0,594	0,429	0,330	0,393	0,636	0,477	0,190	0,863	0,630
5500	0,578	0,461	0,307	0,386	0,667	0,451	0,194	0,875	0,584
5750	0,536	0,521	0,271	0,336	0,743	0,398	0,144	0,953	0,527
6000	0,628	0,409	0,247	0,435	0,621	0,377	0,247	0,827	0,502
6500	0,596	0,462	0,223	0,372	0,706	0,378	0,035	1,142	0,303
7000	0,572	0,503	0,122	0,364	0,750	0,163	0,145	1,005	0,215

Остается, между тем, нерешенным вопрос о том, какое из двух предлагаемых регрессионных уравнений дает лучшие результаты для рассматриваемого участка. Объективный ответ на заданный вопрос получается совмещением коэффициентов множественной корреляции и средних квадратических резидуальных отклонений  $(R_1, S_1)$  для равенства [1] и  $(R_2, S_2)$  для равенства [2], табл.3. Из этой таблицы видно, что  $R_2 > R_1$  а  $S_1 > S_2$  для всех выходных расходов и для всех интервалов времени  $\Delta t$ , что ясно указывает на то, что регрессионное уравнение [2] представляет собой, по отношению к равенству [1], лучшую модель для краткосрочного прогнозирования на рассматриваемом приточном участке р. Дунай. Проверка эффективности односуточных, полторасуточных и двухсуточных прогнозов исполнена на примере паводочных волн, которые наблюдаются в периоде после 1970 года, т.е. в периоде, данные из которого не рассматривались в регрессионном анализе.

Сначала, на основе данных из табл.2, определены зависимости регрессионных коэффициентов  $a$ ,  $a_1$  и  $a_2$  от расхода в створе Богоево, рис.3, 4, и 5. На основе определенных таким образом зависимостей  $a = f(Q_t)$ ,  $a_1 = f_1(Q_t)$  и  $a_2 = f_2(Q_t)$  и регрессионного уравнения [2], даются односуточные, полторасуточные и двухсуточные прогнозы расходов для водомерного поста Богоево. Результаты для характерных паводочных волн (рис.6-9), показали очень хорошее соответствие наблюдаемых и рассчитанных расходов, так как ошибки прогнозов в очень редких случаях превосходит 5% по отношению к наблюдаемым расходам. Большинство ошибок находится в пределах 2-3%, что действительно можно считать очень хорошим результатом.

#### Анализ нелинейных регрессионных связей

Линейное регрессионное уравнение [2] с переменным коэффициентом, как показано, является действительно хорошей прогностической моделью для рассматриваемого приточного участка. Но, несмотря на то, существует вопрос: какую связь дала бы нелинейная регрессионная зависимость, т.е. какие результаты прогнозирования?

С этой целью здесь анализированы нелинейные регрессионные зависимости путем нормализации всех переменных, по методу предложенному Алексеевым [3].

Для этого сделаны алгоритм и программа для ЭВМ<sup>+/</sup> для нормализации входных данных - случайных переменных  $x_{ji}$ , пользуясь отношением [3]:

$$p_m = \frac{m(x_{ji}) - 0,25}{N + 0,5} = p_j(x_{ji}) = p_{ji} \quad [3]$$

где  $p_m = p_j(x_{ji}) = p_{ji}$  - эмпирическая вероятность непревышения наблюдаемых значений

$x_{ji}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ),  $m(x_{ji})$  - ранговые номера наблюдаемых значений  $x_{ji}$  после их ранжирования в возрастающем порядке,  $N$  - число наблюдаемых членов  $x_{ji}$  рассматриваемой выборки. Соответствующие эмпирические значения  $z_j(x_{ji}) = z_{ji} = z_m$  нормированной переменной  $z_j(x_j)$  определяются по известной таблице значений нормальной нормированной интегральной функции распределения

$$p_j(x_{ji}) = p_m = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_m} e^{-z^2/2} dz = \Phi(z_m) \quad [4]$$

как обратные функции

$$z_{ji} = \Phi^{-1}[p_j(x_{ji})] = z_j(x_{ji}) \quad [5]$$

<sup>+/</sup> Программы, использованные в настоящей работе, сделаны вместе с канд. мат. наук Серафимом Оприцовичем, высшим сотрудником Математического Института в Белграде.

ТАБЛИЦА 3

СРАВНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МНОГОЧЛЕННОЙ КОРРЕЛЦИИ И СРЕДНИХ КВАДРАТИЧЕСКИХ РЕЗИДУАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ ПОЛУЧЕННЫХ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ  $\sqrt{1 - R_1^2 - S_1}$  И УРАВНЕНИЯ  $\sqrt{2 - R_2^2 - S_2}$

$Q_t = \text{const}$ (m/sec)	$\Delta t = 1$ СУТ.		$\Delta t = 1,5$ СУТ.		$\Delta t = 2$ СУТ.	
	УРАВ. (1) $R_1$	УРАВ. (2) $S_2$	УРАВ. (1) $R_1$	УРАВ. (2) $S_2$	УРАВ. (1) $R_1$	УРАВ. (2) $S_2$
2000	0,774	0,829	0,739	0,826	0,713	0,753
2500	0,577	0,846	0,585	0,826	0,576	0,798
3000	0,718	0,806	0,711	0,780	0,753	0,830
3500	0,844	0,853	0,850	0,854	0,848	0,848
4000	0,933	0,936	0,931	0,933	0,925	0,927
4250	0,903	0,927	0,908	0,931	0,902	0,930
4500	0,929	0,938	0,922	0,932	0,916	0,926
4750	0,868	0,873	0,913	0,919	0,928	0,934
5000	0,920	0,959	0,927	0,967	0,925	0,965
5250	0,822	0,829	0,875	0,884	0,935	0,946
5500	0,868	0,961	0,872	0,926	0,864	0,954
5750	0,811	0,853	0,871	0,914	0,898	0,938
6000	0,665	0,688	0,761	0,786	0,808	0,835
6500	0,930	0,968	0,944	0,973	0,809	0,899
7000	0,875	0,957	0,863	0,952	0,863	0,953

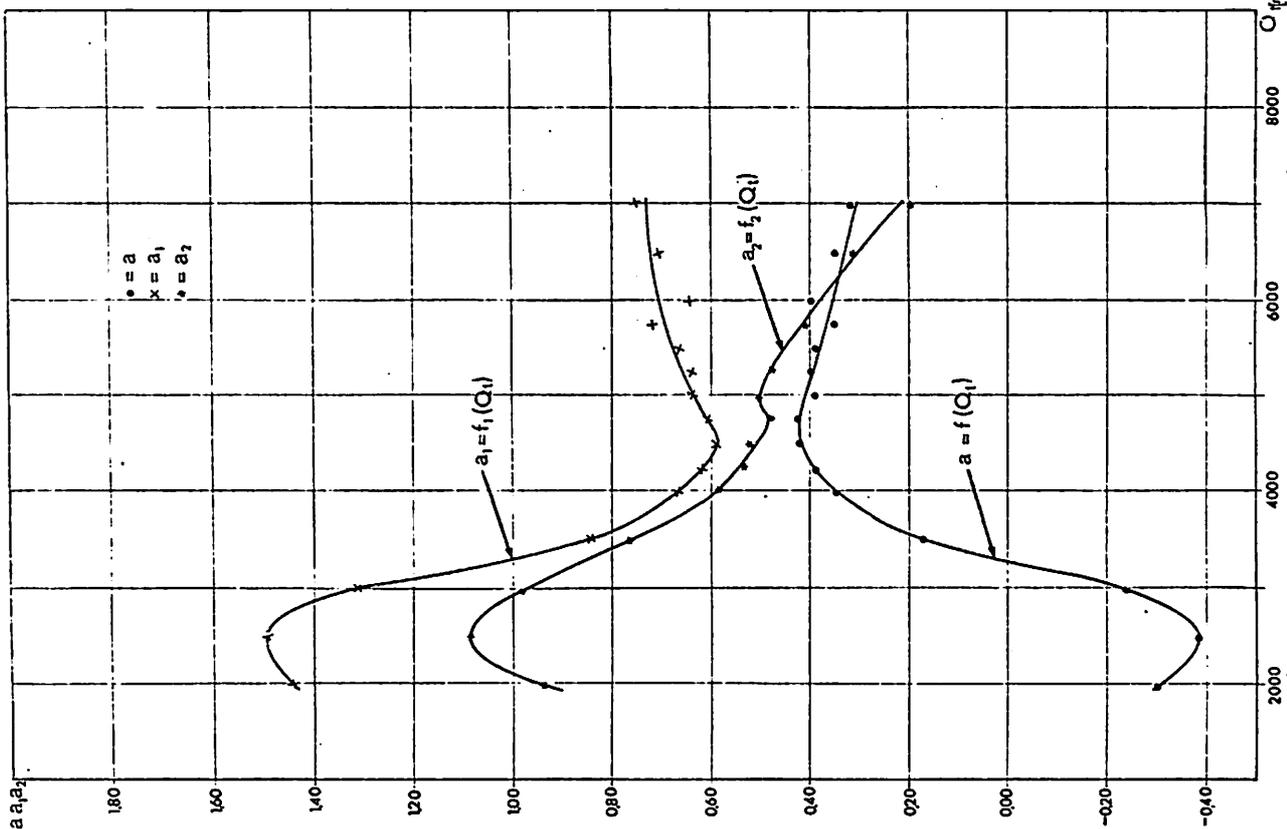


Рис. 4. ЗАВИСИМОСТИ РЕГРЕССИОННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ  $a, a_1, a_2$  ОТ РАСХОДА В СТУПЕНЬ РОГОВОУ-а =  $f(Q_t)$ ,  $a_1 = f_1(Q_t)$ ,  $a_2 = f_2(Q_t)$  - ДЛЯ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТИ  $\Delta t = 1,5$  СУТОК

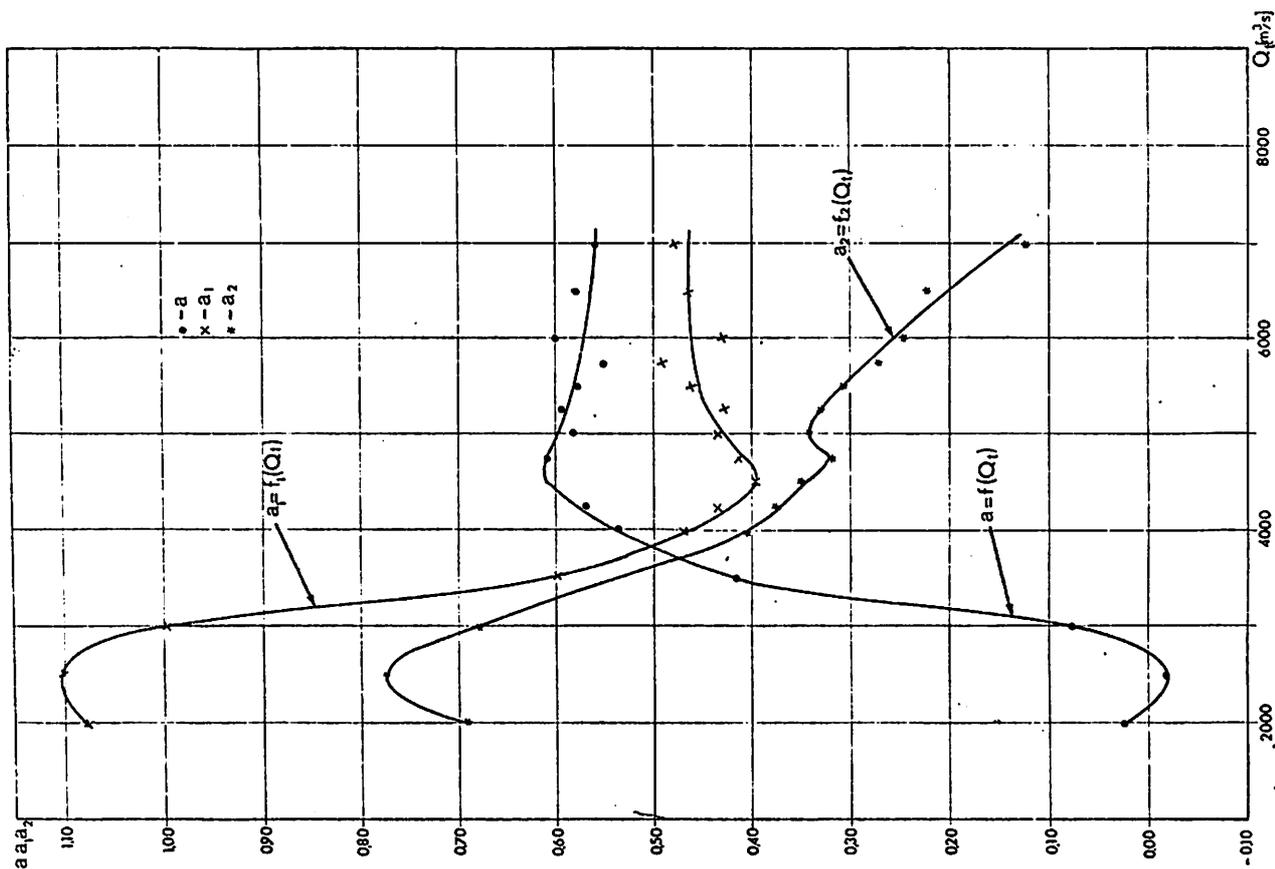


Рис. 3. ЗАВИСИМОСТИ РЕГРЕССИОННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ  $a, a_1, a_2$  ОТ РАСХОДА В СТУПЕНЬ РОГОВОУ-а =  $f(Q_t)$ ,  $a_1 = f_1(Q_t)$ ,  $a_2 = f_2(Q_t)$  - ДЛЯ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТИ  $\Delta t = 1$  СУТКИ

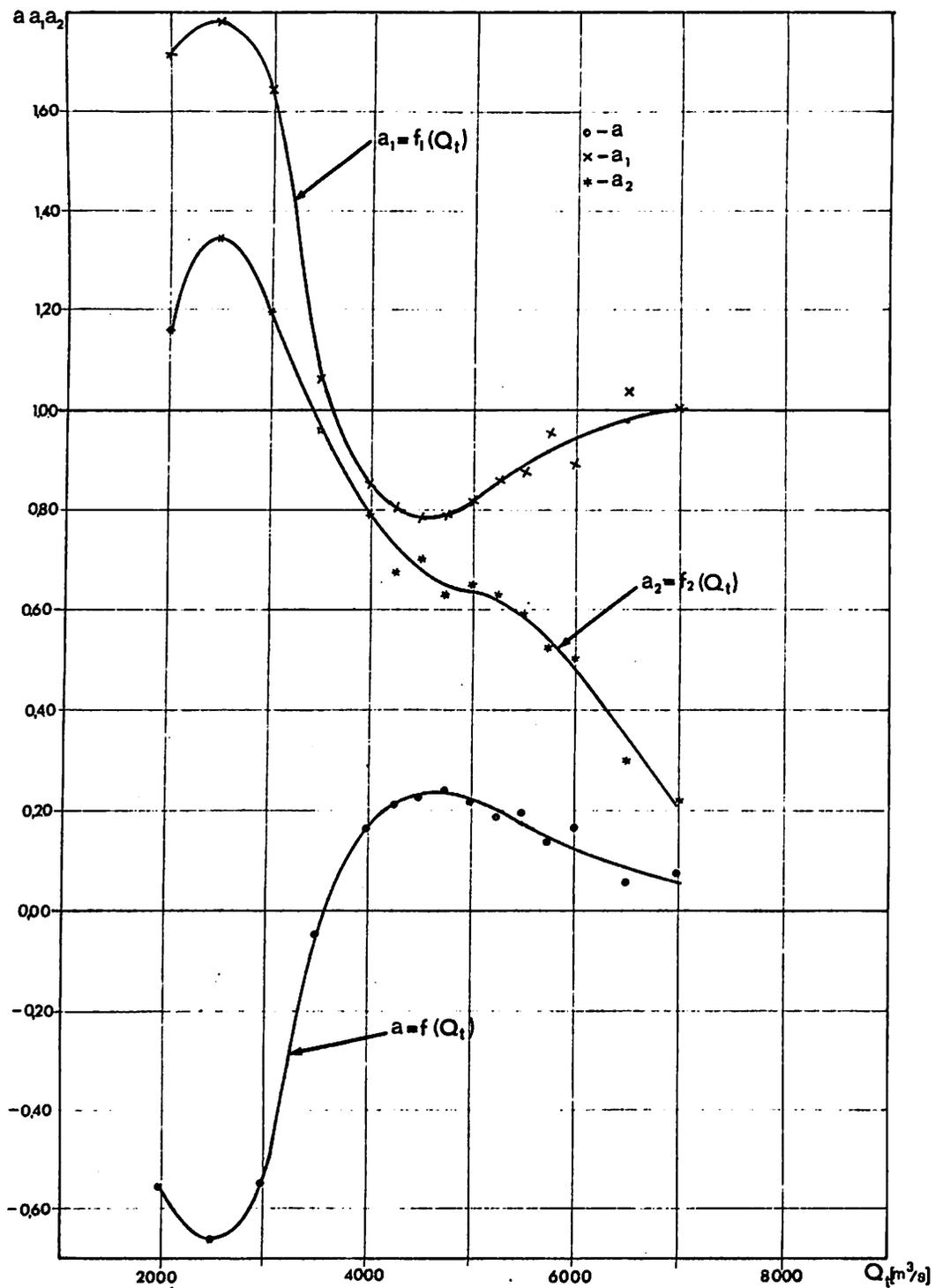


Рис. 5 ЗАВИСИМОСТИ РЕГРЕССИОННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ  $a, a_1, a_2$  ОТ РАСХОДА В СТВОРЕ БОГОЕВО- $a = f(Q_t), a_1 = f_1(Q_t), a_2 = f_2(Q_t)$  ДЛЯ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТИ  $\Delta t = 2$  СУТОК

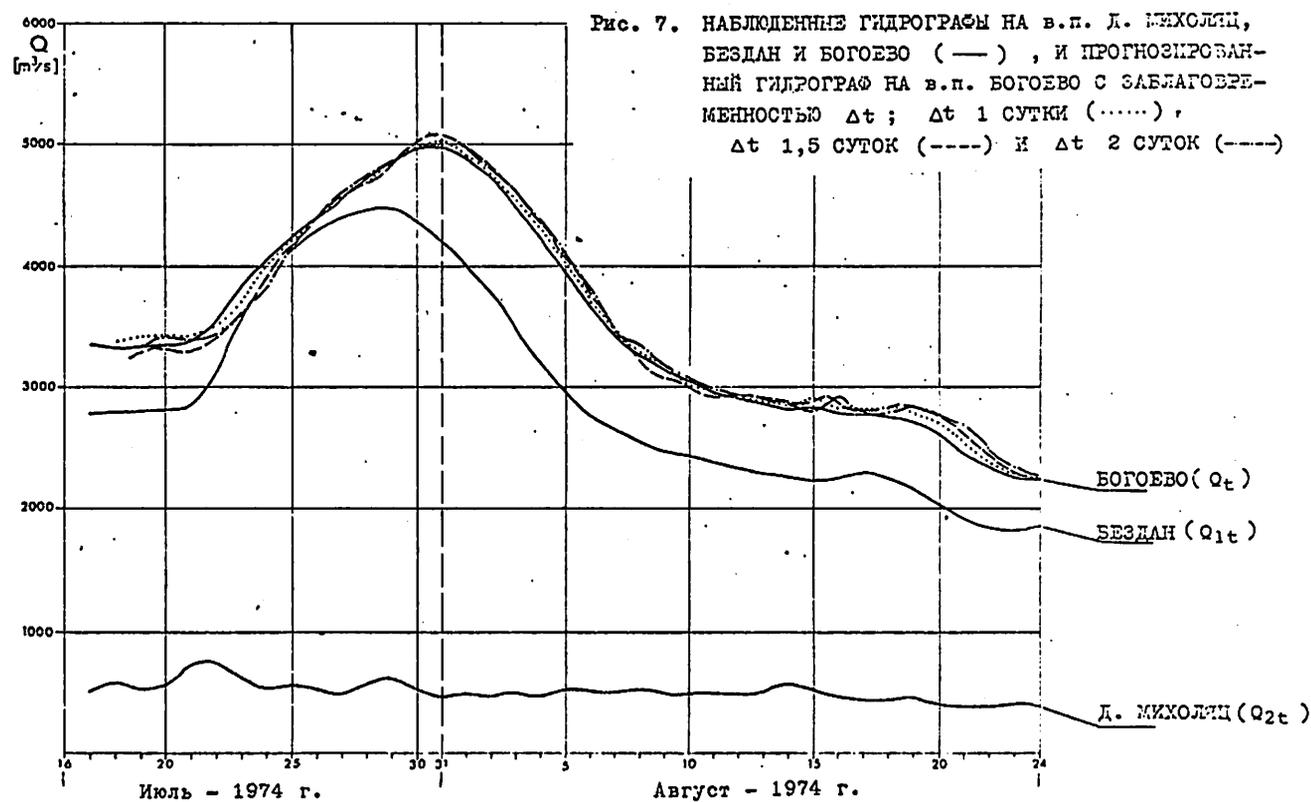
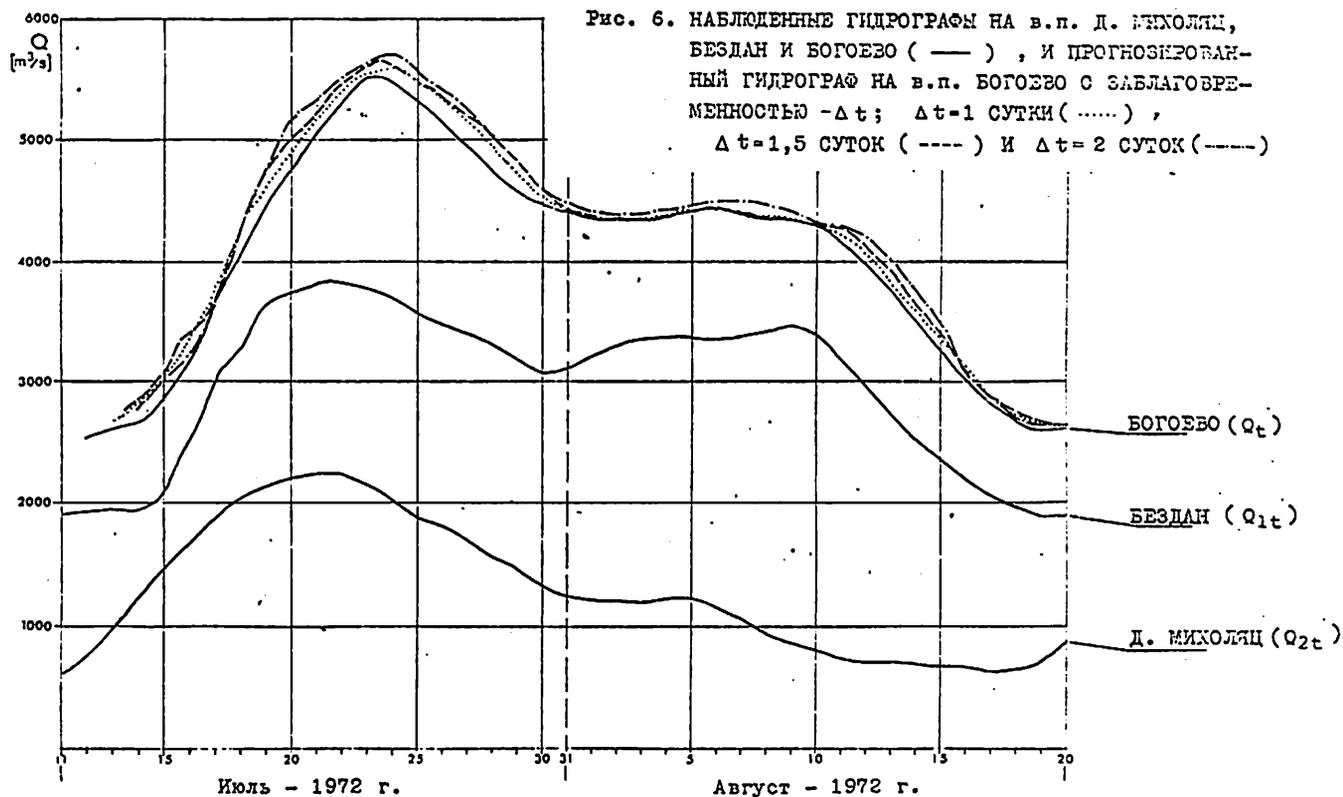


Рис. 8. НАБЛЮДЕННЫЕ ГИДРОГРАФЫ НА в.п. Д. МИКОЛЦИ, БЕЗДАН И БОГОЕВО (—), И ПРОГНОЗИРОВАННЫЙ ГИДРОГРАФ НА в.п. БОГОЕВО С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ  $\Delta t$ ;  $\Delta t=1$  СУТКИ (.....),  $\Delta t=1,5$  СУТОК (----) И  $\Delta t=2$  СУТОК (---).

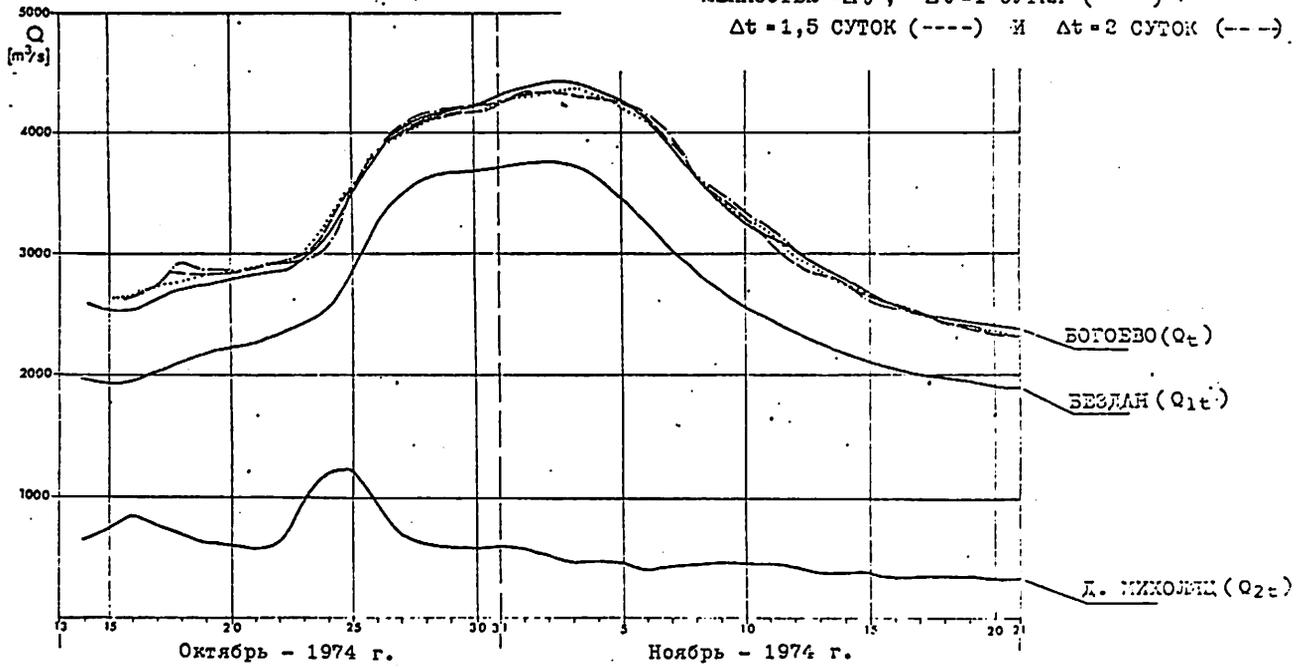
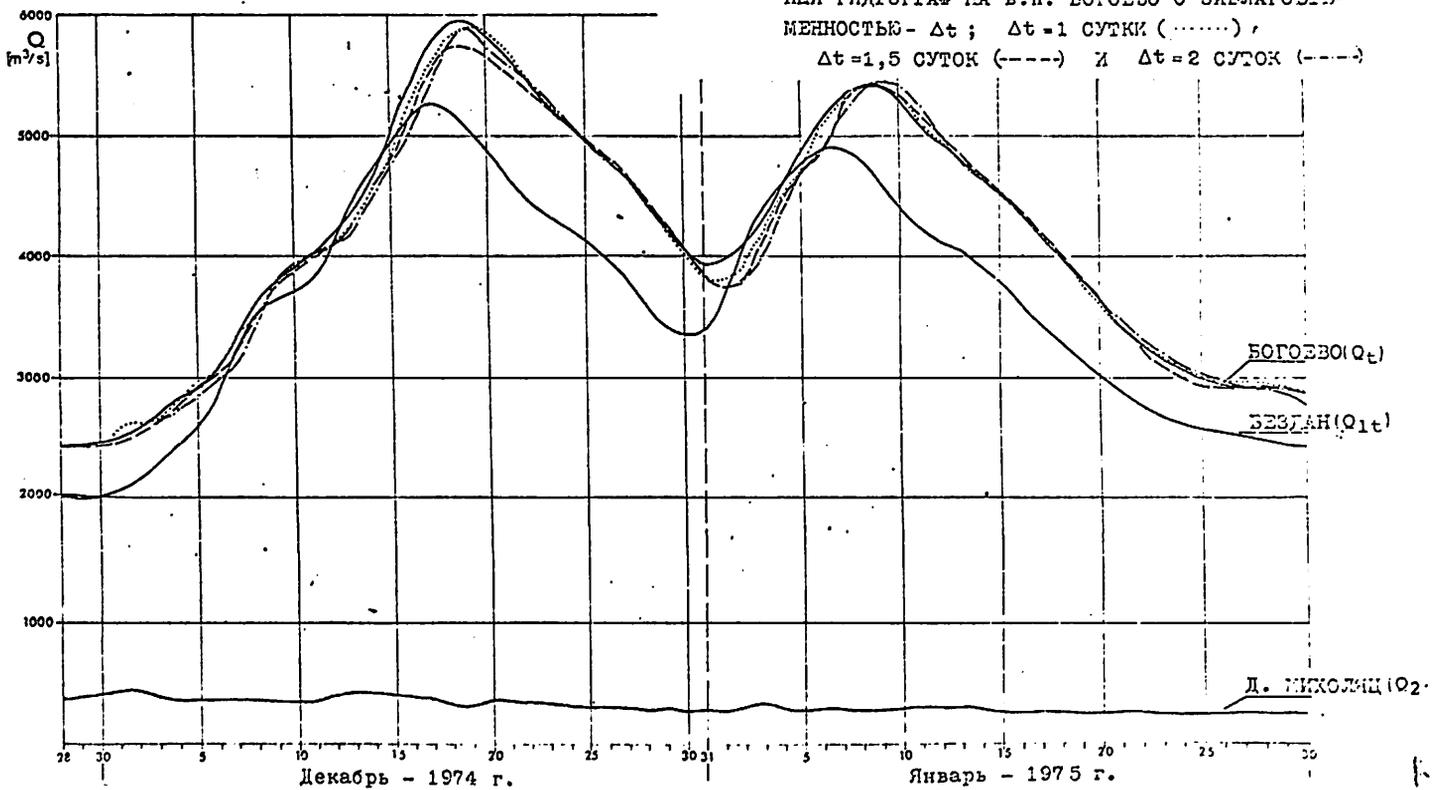


Рис. 9. НАБЛЮДЕННЫЕ ГИДРОГРАФЫ НА в.п. Д. МИКОЛЦИ, БЕЗДАН И БОГОЕВО (—), И ПРОГНОЗИРОВАННЫЙ ГИДРОГРАФ НА в.п. БОГОЕВО С ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ  $\Delta t$ ;  $\Delta t=1$  СУТКИ (.....),  $\Delta t=1,5$  СУТОК (----) И  $\Delta t=2$  СУТОК (---).



Применением вкратце изложенного поступка получены нормированные значения переменных входящих в уравнение [2]:

$$Q_{t+\Delta t} \rightarrow z_{t+\Delta t}, Q_{1t} \rightarrow z_{1t}, Q_{2t} \rightarrow z_{2t}, Q_t \rightarrow z_t$$

Таким способом, так как теперь все переменные имеют нормальное распределение, определено, можно сказать, что линейная корреляционная связь самая крепкая и, следовательно, регрессионное уравнение [2] с нормированным переменным  $z_j$

$$z_{t+\Delta t} = \alpha z_t + \alpha_1 z_{1t} + \alpha_2 z_{2t} \quad [6]$$

имеет полное теоретическое обоснование. Переход на исходные переменные осуществляется очень просто на базе предварительно построенных эмпирических зависимостей между исходным  $x_j$  и нормированным  $z_j$  переменным [3].

Пользуясь таким способом определенным значениям нормированных величин, вычислены параметры равенства [6], тем же способом как и для равенств [1] и [2]. Сопоставлением коэффициентов множественной корреляции полученных для равенства [6] -  $R_2$  и для равенства [2] -  $R_2$ , можно судить о качестве рассматриваемых связей. Это осуществлено в таблице 4, из которой видно, что коэффициенты  $R_2$  всегда очень близки, а иногда и больше коэффициентов  $R_2$ . Из этого можно заключить, что при решении такой задачи, регрессионная связь между нормированными значениями переменных не дают лучшие результаты. Причина заключается в том, что таким, специальным способом формируемые исходные величины, уже имеют нормальное распределение и в таком случае нелинейные регрессионные связи не имеют место, т.е. в таких случаях получаются практически те же результаты как и у линейных связей (табл. 4) и, следовательно, надо остановиться на линейных моделях.

ТАБЛИЦА 4

СРАВНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ МНОЖЕСТВЕННОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ПОЛУЧЕННЫХ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ /2/ -  $R_2$  И УРАВНЕНИЯ /6/ -  $R_2$

$Q_t = \text{const.}$ [м <sup>3</sup> /сек.]	$\Delta t = 1 \text{сут}$		$\Delta t = 1,5 \text{сут}$		$\Delta t = 2 \text{сут}$	
	$R_2$	$R_z$	$R_2$	$R_z$	$R_2$	$R_z$
2000	0,829	0,815	0,788	0,776	0,753	0,784
2500	0,846	0,848	0,826	0,853	0,798	0,829
3000	0,806	0,724	0,780	0,619	0,830	0,787
3500	0,853	0,842	0,854	0,847	0,848	0,840
4000	0,936	0,935	0,933	0,930	0,927	0,925
4250	0,927	0,920	0,931	0,929	0,930	0,927
4500	0,938	0,934	0,932	0,934	0,926	0,924
4750	0,873	0,851	0,919	0,906	0,934	0,930
5000	0,959	0,956	0,967	0,963	0,965	0,959
5250	0,828	0,844	0,884	0,887	0,946	0,940
5500	0,961	0,959	0,962	0,963	0,954	0,951
5750	0,853	0,821	0,914	0,905	0,938	0,932
6000	0,688	0,749	0,786	0,839	0,835	0,875
6500	0,968	0,936	0,973	0,960	0,899	0,859
7000	0,957	0,920	0,952	0,932	0,953	0,941

### Заклучение

На основании осуществленных анализов и полученных результатов для приточного участка Бездан-Д.Михоляц-Богоево, можно сделать следующие выводы:

- Регрессионные уравнения с переменными коэффициентами можно успешно применять в качестве прогностических моделей для краткосрочного прогноза на р. Дунай, в тех случаях, когда недостаток надежных данных изменений и наблюдений делает невозможным применение точных гидравлических методов.
- Из анализированных линейных регрессионных уравнений [1] и [2], уравнение [2] дает лучшие результаты и может успешно использоваться для оперативного краткосрочного прогнозирования для водомерного створа Богоево.
- Не существует нелинейная регрессионная связь между анализированными переменными, так что равенство [6] дает практически те же результаты, что уравнение [2]. Между тем уравнение [2] представляет собой более простую модель, с точки зрения ее оперативного применения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Янкович Д. Расчет движения и расплывания паводочной волны уравнением связи соответственных расходов с переменными коэффициентами. VII Конференция придунайских стран по гидрологическим прогнозам, Варна, 1973.
2. Калинин Г.П., Милюков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс. Тр. ЦИП, вып. 66, 1958.
3. Алексеев Г.А. Объективный метод выравнивания и нормализации корреляционных связей. Метеорология и гидрология, № 11, 1969.
4. Fisz M. Probability theory and Mathematical Statistics. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1963.
5. Рождественский А., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Гидрометеоздат, Ленинград, 1974.
6. Ven Te Chow Handbook of Applied Hydrology. Mc Grow-Hill book company. New York, 1964.
7. Petković T. Mogućnost primene prostorne korelacione funkcije za odredjivanje minimalnog oticanja. Savetovanje o hidrološkim aspektima malih voda. Budva, 1974.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ДЕКАДНЫХ РАСХОДОВ  
НА НИЖНЕМ ТЕЧЕНИИ РЕКИ САВА И ВОЗМОЖ-  
НОСТЬ ВЕДЕНИЯ ИХ ПРОГНОЗА

М.С.Оцоколич

10-TAGESABFLOSSE IM UNTERLAUF DER SAWE  
UND IHRE VORHERSAGEMÖGLICHKEITEN

M.S.Ocokolič

Резюме

В работе рассмотрена последовательность декадных расходов реки Сава в периоде с 1926 - 1970 гг. Рассмотрено взаимоотношение трех непостоянных: расхода, времени появления и частоты (продолжительности).

В нескольких примерах приведена зависимость расхода в разное время и продолжительности. Обработаны и некоторые другие гидрологические параметры декадных расходов, употребляемых для разного рода гидрологических изучений, в первую очередь при изучении режимов рек.

Поскольку в работе обработана одна небольшая единица времени, в данном случае декада, достигнутые результаты в некоторой степени могут послужить при долгосрочных гидрологических прогнозах.

В отдельном разделе работы сделано обозрение на возможность прогноза декадных расходов на две декады (20 дней вперед) применением простейших автокорреляций.

Результаты таковых изучений показывают, что прогноз расходов реки Сава на 20 дней вперед, можно вести с большим процентом точности.

Zusammenfassung

In der Arbeit wurde die Folge der Dekadenabflüsse des Flusses Sawa im Zeitabschnitt von 1926 - 1970 untersucht. Es wurde das gegenseitige Verhältnis der drei Veränderlichen beobachtet: Abfluß, Zeit der Erscheinung und Häufigkeit (Dauer).

An einigen Beispielen wurde die Beziehung zwischen dem Abfluß zu verschiedenen Zeiten und der Dauer gezeigt. Es wurden auch einige andere hydrologische Parameter der Dekadenabflüsse untersucht, die für verschiedene hydrologische Forschungsarbeiten benützt werden - vorrangig bei der Forschung des Regimes der Flüsse.

Obwohl in der Arbeit eine verhältnismäßig kurze Zeiteinheit bearbeitet wurde - in diesem Fall eine Dekade - können die Resultate bis zu einem gewissen Grad auch für langfristige hydrologische Vorhersagen herangezogen werden.

In einem gesonderten Abschnitt der Arbeit wurde ein Überblick auf die Prognosemöglichkeit der Dekadenabflüsse für zwei Dekaden (20 Tage) durch Anwendung der einfachen Autokorrelationen gegeben.

Die Resultate solcher Forschungen zeigen, daß die Vorhersage der Abflüsse der Sawa für die nächsten 20 Tage mit ziemlich großer Genauigkeit gemacht werden können.

Взаимосвязь между расходом, временем и частотой (длительностью) расхода в разных единицах времени, дает возможность сделать определенные выводы в отношении временных явлений или изучение режимных характеристик расхода связанных с определенной датой, количеством и длительностью (частотой).

Если эти величины рассматривать в коротких единицах времени, например, пентаде, декаде, месяце или сезоне, в гидрологии чаще всего употребляем название "последовательность", хотя это название можно заменить выражением (частота). Но, поскольку в конкретной работе рассматриваются декадные расходы т.е. одна небольшая годовая или месячная единица времени, принято название "последовательность". Рассматриваются не только периоды с поя-

влением характерных расходов определенной частоты в декаде, но и временное явление частоты расхода определенного класса.

Показания режимов рек и использование таковых данных в гидрологии производятся несколькими способами. Чаще всего используются математико-статистические методы или соответствующие стохастические процессы в гидрологии.

В этом случае, особенно при таком способе изучения, чаще всего единицей времени служит год (средние годовые величины) разных гидрологических величин.

Как уже сказано, в настоящей работе рассматриваются декадные расходы, отработанные способами и характеризующие каким-то образом режимы рек или используемые для других видов гидрологического изучения.

Значение данного способа изучения состоит прежде всего в определении вероятности появления расхода в определенной единице времени обусловленной какой-то датой. При этом используются долготлетние наблюдения в прошлом, чтобы можно было на основании их определить вероятнейшие годовые явления расхода в будущем.

Последовательность декадных расходов выражена тремя непостоянными: расход ( $Q$ ), время ( $T$ ) и частота ( $Y$ ). Обработан профиль Сремской Митровицы в нижнем течении р. Сава в периоде с 1926 - 1970 гг. (45 лет). В конце дается обзор на возможность прогноза декадных расходов применением общих или простейших корреляций.

На рис.1 указана взаимосвязь между расходом, временем и длительностью расхода по отдельным декадам в периоде 45 лет в районе нижнего течения р. Сава в профиле Сремской Митровицы, представленной в виде нескольких диаграмм. Каждая диаграмма представляет параметр величины расхода 1, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95, и 100% длительностей. При этом, расходы длительностью 1% представляют абсолютные максимальные явления в соответствующей декаде года, а  $Q$  100%, кроме соответствующей длительности еще и абсолютно минимальные величины расхода. На рис.2 указаны режимные характеристики декадного расхода, представленные шестью диаграммами.

На диаграмме №1 указаны декадные расходы в периоде с 1926 - 1970 гг.; диаграмма №2 обозначает расходы с наибольшей частотой ( $U_i \max$ ), а линия №3 расходы длительностью 100% в максимуме ( $Q \max$  100%). Коэффициент равномерной утечки ( $UQ$ ), среднее квадратное отступление (вариация) ( $\delta Q$ ) и коэффициент вариации ( $CV$ ) декадных расходов указаны на диаграмме 4, 5 и 6.

#### Обзор режимных характеристик реки Сава

В профиле Сремской Митровицы на р. Сава с площадью бассейна 87 996 км<sup>2</sup> ведутся долготлетние гидрологические наблюдения. Обработка периода с 1926- 1970 гг., способствовала получению характерных расходов, полученных с кривой расхода, определенной измерением по всей амплитуде уровня воды. Правда, по измерениям после 1965 года кривая расхода большого уровня воды несколько изменилась в меньшую сторону расхода при том же уровне, но эти отступления можно пренебречь т.к. они достигают при самых больших уровнях  $\pm 3-4\%$ .

Средний годовой расход р. Сава в вышеуказанном профиле составляет 1 620 м<sup>3</sup>/сек, с наименьшим уровнем воды 212 м<sup>3</sup>/сек и наибольшим 5 880 м<sup>3</sup>/сек. Самые большие расходы являются в апреле или марте, а наименьшие в сентябре или августе.

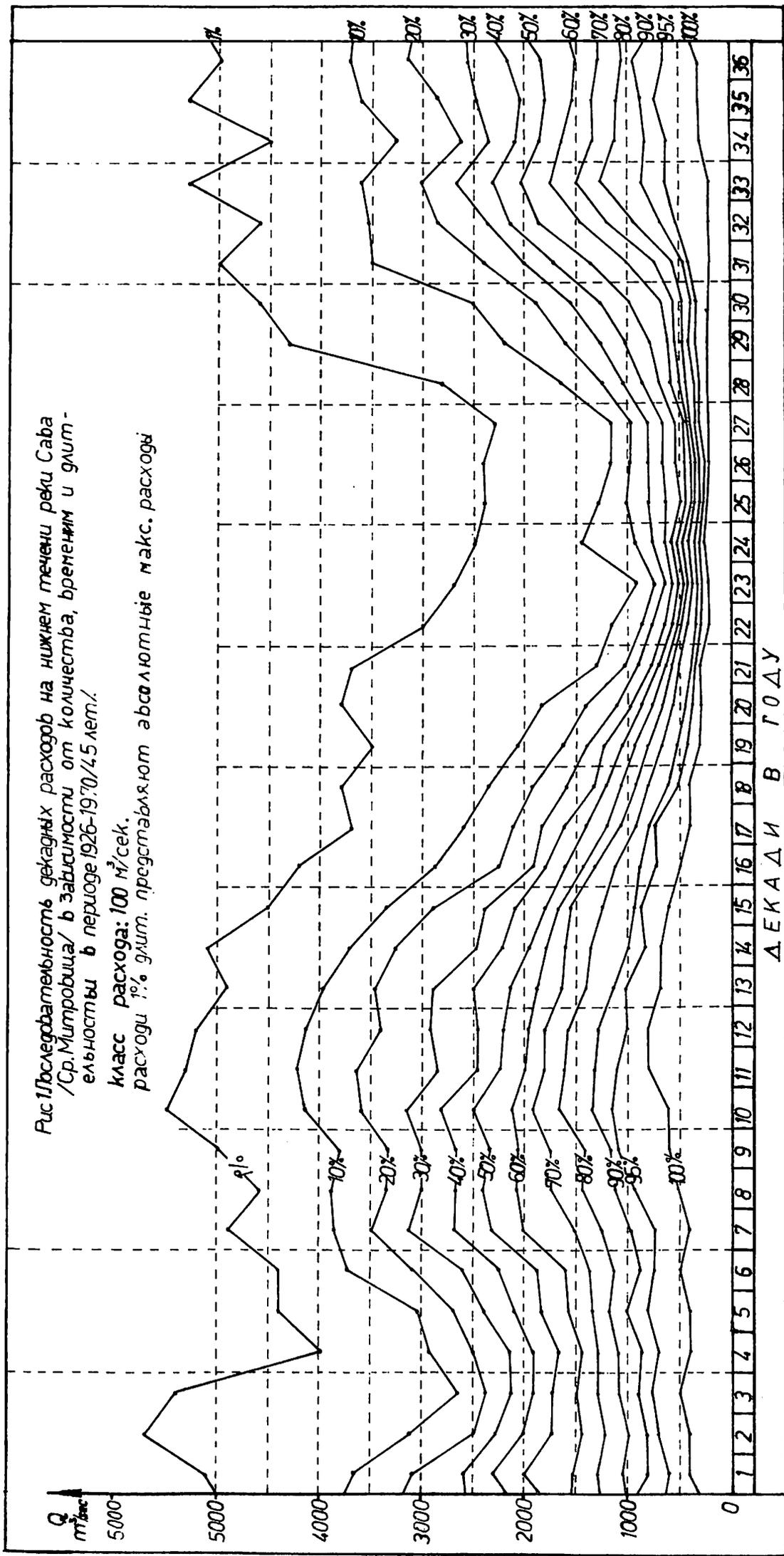
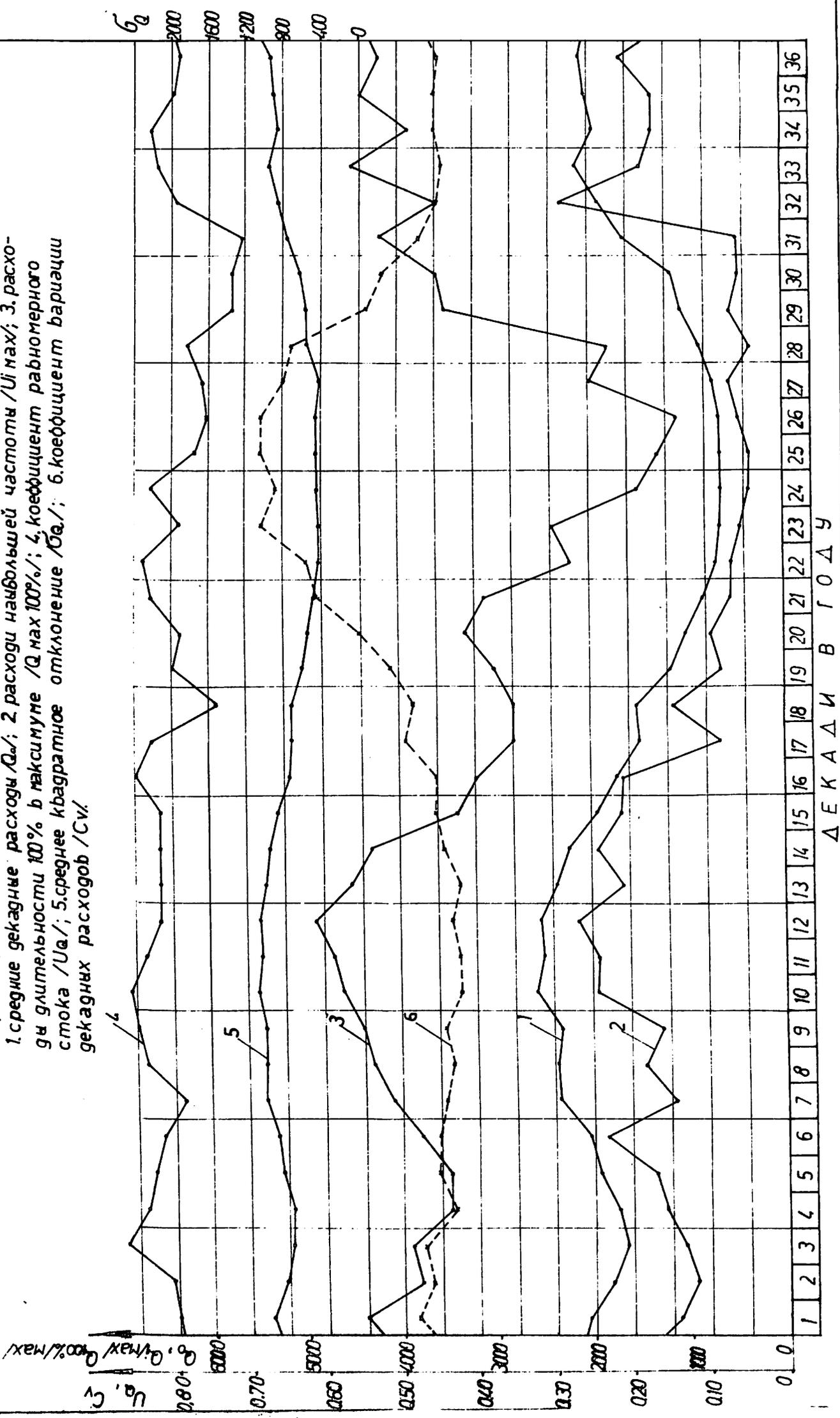


Рис 2. Характерные параметры декадных расходов реки Савы, в периоде 1926-1970/45 лет/  
 1. средние декадные расходы /Q̄/; 2. расходы наибольшей частоты /Q<sub>max</sub>/; 3. расхо-  
 дя длительности 100% в максимуме /Q<sub>max</sub> 100%/; 4. коэффициент равномерного  
 стока /U<sub>av</sub>/; 5. среднее квадратное отклонение /Q̄<sub>св</sub>/; 6. коэффициент вариации  
 декадных расходов /C<sub>v</sub>/.



ДЕКАДА В ГОДУ

Большая часть бассейна р. Сава находится в горных пределах, при чем его большая часть находится над уровнем моря 600 - 800 м, а средний уровень бассейна находится над уровнем моря свыше 400 м.

Расстояние водонапорной башни от устья р. Дунай 136 км (Д=136 км).

Среднее падение бассейна 1,68 м/км (S = 1,68 м/км). В бассейне имеется достаточное количество карстовых явлений, составляющих 25% общей площади бассейна р. Сава.

Средняя удельная утечка (Q) = 18.3 л/сек/км<sup>2</sup>, а годовые осадки 1 120 мм. Эффективные осадки 557 мм. Средняя годовая температура 9.05°С и т.п.

#### Использование диаграммы характеристик режима реки

В данной работе режим реки Сава выражен обработкой декадного расхода согласно Рис.1 и 2

Диаграммы данного рода могут использоваться в гидрологии разными способами, в зависимости от поставленной цели при изучении.

Можно делать определенные выводы в связи с изучением режима реки, связанных с наименьшей единицей времени, а затем их использовать для гидрологических потребностей, в целях орошения полей, планировки водоснабжения, защиты от наводнения и т.д.

Кроме того, такие диаграммы, в некоторой степени, можно использовать при составлении прогнозов расхода реки т.к. они обусловлены короткой единицей времени, в данном случае декадой, 15, 20 или свыше дней.

Согласно Рис.1 и 2 декадные расходы р. Сава сопровождаются месячными расходами. Сильнейшие бывают весной и поздней осенью т.е. в десятой декаде года (первая декада апреля), 11, 12 и 33 декаде и т.д.

Наблюдая декадные расходы, на приведенных примерах, можно сделать определенные выводы в отношении режима длительности расхода по месяцам.

Поскольку месяц состоит из 3-х декад, то сумма их величин дает месячные величины характерных длительностей или частоту расхода. Например, в апреле т.е. в 10, 11, и 12 декаде года характерными расходами определенной длительности будут расходы, определяемые по следующей формуле:

$$Q(t)_{IV} = \frac{Q(t)_{10} + Q(t)_{11} + Q(t)_{12}}{3} \quad [1]$$

то есть при практически графическом изображении на Рис.1, например, для характерных расходов в апреле - получим  $Q_{50\%}(IV) = 2\ 310\ \text{м}^3/\text{сек}$ , а  $Q_{20\%}(IV) = 3\ 550\ \text{м}^3/\text{сек}$  и т.п.

Характерные точки на диаграмме Рис.1 позволяют построение кривой длительности расхода для декад или месяц.

Известно, что расходы в течение года изменяются по амплитуде и времени. Например, амплитуда расхода  $Q_{10\%}$  длительности будет  $Q_A = 3\ 300\ \text{м}^3/\text{сек}$ , в отношении абсолютной амплитуды  $5\ 680\ \text{м}^3/\text{сек}$ .

Даты, в которых средний расход определенной длительности пересекает характерные временные пределы, также может определяться по графику № 1. Эти даты имеют большое значение

при гидрологическом изучении рек, в гидроэнергетике и особенно в прогнозе вод.

Например, рассматривая средние декадные расходы на Рис.2 (диаграмма 1) во времени их появления, замечаем, что расход  $Q \geq 2000 \text{ м}^3/\text{сек}$  длится с 6 по 13 и с 33 по 34 декады. Расход  $Q \geq 2000 \text{ м}^3/\text{сек}$ , выраженный во времени, длится в среднем в год  $TQ = 10$  декад, т.е. приблизительно 104 дня.

Среднюю дату, когда расход возрастает или падает, например, свыше 1 000, 2 000 или 3 000  $\text{ м}^3/\text{сек}$ , можно определить по следующей формуле:

$$DQ(t)\uparrow = \frac{10 [Q_i(t) - Q_I(t)]}{Q_2(t) - Q_I(t)} + t_s \quad [2]$$

где:  $DQ(t)\uparrow$  - средняя дата появления определенного расхода и время его нарастания,  $Q_i(t)$  - расход для которого определяем среднюю дату появления,  $Q_I(t)$ ,  $Q_2(t)$  - средние декадные расходы в промежутке которых находится расход  $Q_i(t)$ ,  $t_s$  - средняя дата декады или очередное число дня года между  $Q_I(t)$  и  $Q_2(t)$ . В первой декаде  $t_s = 5$ , во второй  $t_s = 15$  и третьей  $t_s = 25$ .

Наоборот, если хотим определить среднюю дату прекращения того же расхода употребляем формулу:

$$DQ(t)\downarrow = \frac{10 [Q_2(t) - Q_i(t)]}{Q_2(t) - Q_I(t)} + t_s \quad [3]$$

где то же значение как и в равенстве [2].

Средняя длительность  $[TQ(t)]$ , например, расхода свыше 1 000, 2 000, 3 000  $\text{ м}^3/\text{сек}$ , определяем с помощью формулы [2] и [3] т.е. их разницей:  $TQ(t) = DQ(t)\downarrow - DQ(t)\uparrow$  [4]

При использовании формулы [4], средние даты появления и прекращения характерного расхода, с помощью таблиц превращаем в порядковые номера дня и года. Например, 5.III это 64 дня в году, 20.IX это 263 дня в году и т.д.

Употреблением формулы [2] и [3] также и [4] и диаграммы на Рис.1 подсчитаны характерные средние даты с длительностью для р. Сава в профиле Ср. Митровицы.

Средняя дата появления и прекращения характерного  $Q$  определенной длительности приведена в табл. 1.

З и м а - в е с н а							О с е н ь - з и м а						
№ пп	$Q_i$	$Q_i(t)$	$DQ \uparrow$	Число дней	$DQ \downarrow$	Число дней	$TQ(t)$	$DQ \uparrow$	Число дней	$DQ \downarrow$	Число дней	$TQ(t)$	$\Sigma TQ$
1	500	100%	15.III	74	30.V	150	76						76
2	1000	80%	23.I	23	10.VI	161	138	17.XI	321	22.I	22	66	204
3	1500	60%	10.II	41	3.VI	154	113	16.XI	320	10.I	10	53	166
4	2000	40%	10.II	41	29.V	149	108	11.XI	315	15.I	15	65	173
5	2500	20%	5.II	36	2.VI	153	117	8.XI	312	8.I	8	61	178
6	3000	10%	12.II	43	3.VI	154	111	30.X	303	18.I	18	80	191

Для быстрого получения данных (как это частично сделано в таблице № 1) осуществляем без употребления формулы с помощью диаграммы на Рис.1, выраженной в более крупном масштабе на миллиметровой бумаге. Простым подсчетом и измерениями быстро получаем желаемые результаты.

Отдельно на Рис.2 указана последовательность декадных расходов употреблением разных статистических способов. Расходы сопоставлены между собой или в комбинации с данными на Рис.1.

Эти данные, в некоторой степени, могут ориентировочно послужить для прогноза вод, конечно, в комбинации с другими методами гидрологического прогноза.

Расходы наибольшей частоты показаны на диаграмме № 2. Их появление сопровождается временем и количеством. Например, в шестой декаде года частейшие расходы класса от 1 800 - 1 900 м<sup>3</sup>/сек, в 17-ой декаде 600 - 700 м<sup>3</sup>/сек, в 32-ой декаде 2 200 - 2 300 м<sup>3</sup>/сек.

Параллельно с характеристиками средних величин декадных расходов, на диаграмме № 3 приведены расходы длительности 100% в максимуме для каждой декады отдельно по годам.

Большая вариация данных этого рода ясно показана на Рис.2, где, например, видно, что максимальные воды р. Сава могут длиться в декаде 100%.

Отдельно декадные расходы показаны посредством коэффициента равномерности утечки (UQ), выраженного по формуле:

$$UQ = \frac{Wsr}{Wu} \quad [5]$$

где: Wsr - емкость воды ниже средних расходов, Wu - общая емкость утекших вод в течение года.

Эти данные, в некоторой степени находятся в прямой зависимости от коэффициента вариации [6]. Показывает равномерность утечки в течение декады. Чем больше приближается к единице, тем значительнее часть небольших и частично средних вод участвует в общей утечке реки.

Согласно диаграмме [4] участие небольших и средних вод в первое полугодие значительно больше, а следовательно и равномерность расхода в этих декадах больше, чем в летнем и осеннем периодах.

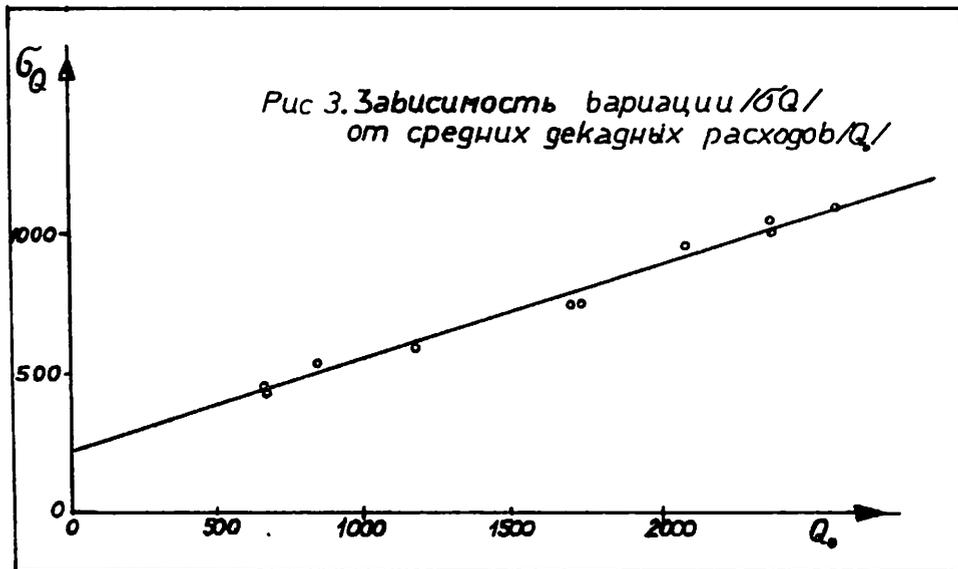
Среднее квадратное отступление или изменчивость  $\sigma Q$  также представляет один из важных гидрологических параметров (линия 5). Определение произведено сокращенным методом, т.е. через графоаналитический способ определения параметров кривых распределения.

$$\sigma Q = \frac{Q_{5\%} - Q_{95\%}}{\sigma_{5\%} - \sigma_{95\%}} \quad [6]$$

Величины  $\sigma_{5\%}$  и  $\sigma_{95\%}$  для соответствующего коэффициента асимметрии (CS) получены через коэффициент уклона кривой распределения (S) непосредственно зависимо от (CS), т.е. употреблением формулы

$$S = \frac{Q_{5\%} + Q_{95\%} - 2Q_{50\%}}{Q_{5\%} - Q_{95\%}} \quad [7]$$

С целью избежания такого подсчета по каждой декаде года, а как известно, их имеется 36, произведено дальнейшее сокращение действия так, что для несколько характерных точек сделана зависимость между  $\sigma Q$  и  $Q_0$  т.е.  $Q_0 = f(\sigma Q)$  как указано на Рис.3.



Среднее квадратное отступление и средние декадные расходы находятся в линейном отношении и выражаются по следующей формуле:

$$\sigma_Q = 0,34 Q_0 + 220 \quad [8]$$

Из предыдущего действия получен следующий очень важный параметр  $C_V$  — коэффициент вариации декадных расходов, употреблением формулы:

$$C_V = \frac{\sigma_Q}{Q_0} \quad [9]$$

Данный параметр также показывает, что больше всего декадные вариации расходов бывают в летнем периоде, когда больше всего ощущается влияние испарений (большие потери воды в бассейне) и больших осадковых колебаний в этом периоде года.

Зная  $C_V$ ,  $\sigma_Q$  и  $Q_0$  можно получить средние декадные расходы для разных частот явлений, при чем  $C_S$  можно взять как  $2 C_V$  или при лучшем приспособлении употребить формулу [7].

И эти величины могут быть очень полезными при долговременных прогнозах декадных расходов.

#### Возможность прогноза средних декадных расходов

Река Сава находится в числе тех больших рек, в которых вариации декадных расходов меньше чем в других рек, поэтому имеется возможность введения прогноза любыми способами известными для этих целей в гидрологии. Например, корреспонденцией с речными пунктами, расположенными против течения, способами тенденции, емкостью воды в бассейне и т.д. Все же, декадные расходы возможно прогнозировать на длительное время путем применения одного из известных законов стохастических процессов в гидрологии, чаще всего применением разных видов корреляции.

В данном разделе дается параллельную зависимость между декадными расходами первой декады в месяце и месячными расходами. То есть, приводится один вид автокорреляции, т.к.

одна часть месячного расхода сравнивается с другой большей частью (две декады).

Автокорреляции в гидрологии и других естественных науках давно уже известные и употребляются разными способами. Известно, что большинство гидрологических и метеорологических элементов появляются последовательно и в этой последовательности они часто зависят друг от друга. Так, например, известно, что некоторую большую величину расхода, как правило, с большим процентом вероятности, заменит некоторая небольшая величина, или наоборот.

Автокорреляционный способ использует особую функцию т.е. автокорреляционные коэффициенты в функции параметра, сдвинутого по времени или длительности между ряда корреляционных величин.

Между тем, мы хотим здесь показать сокращенное действие определения среднего расхода  $р.Сава$  на 20 дней вперед применением простой линейной корреляции (рис.4 и 5).

Это можно выразить следующим соотношением:

$$Q_{20} = Q_{mes} - Q_1 \quad [10]$$

где:  $Q_{20}$  - расход во второй и третьей декаде в месяце т.е. 20/21/ день,  $Q_{mes}$  - месячный расход,  $Q_1$  - расход в первой декаде того же месяца.

Но так как в этом уравнении появляются две неизвестной то для ее употребления необходимо найти одну неизвестную.

Для достижения этого, используя данные о последовательности декадных расходов и вообще данных о декадных расходах, приведенных в предыдущих разделах, сделана зависимость между расходом в первой декаде и средними месячными расходами того же месяца в периоде с 1926-1965 гг., (40 лет) для 12 месяцев в год (рис.4 и 5).

Поскольку в данном случае образуются прямолинейные (линейные) зависимости, употреблением средних декадных расходов первой декады в месяце и соответствующих корреляционных прямых (рис.4 и 5), получаются средние месячные величины, а их взаимной разницей, как это выражено выше, средний расход на 20 дней вперед. Для быстреего решения данной проблемы употребляется следующую формулу:

$$Q_{20} = \frac{Q_{mes} T_1 - Q_1 T_2}{T_3} \quad [11]$$

где:  $Q_{20}$  - средний расход во второй и третьей декаде в месяце (20 или 21 день),  $Q_{mes}$  - средний месячный расход,  $Q_1$  - средний декадный расход в первой декаде месяца,  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  - число дней в месяце первой декады и вместе во второй и третьей декадах месяца.

Таким же образом, согласно рис.4 и 5 могут быть выражены математическим способом средние декадные и месячные расходы, если этим желается быстреего определения этих величин. Например, для первой декады июня,  $Q_{mes}$  и  $Q_1$  для корреляционной прямой "А" находится в соотношении

$$Q_{mes} = 0.90 Q_1 \quad [12]$$

Рассматривая корреляционные прямые на рис.4 и 5, замечаем их линейность, но не и равенство. Они почти всегда бывают многозначные, чаще всего трехзначные для 10 месяцев в год, реже четырехзначные для двух месяцев в год.

Рис 4. Зависимость между средними декадными расходами в первом дек./ $Q_T$  и сред. месяч. расх./ $Q$  мес./

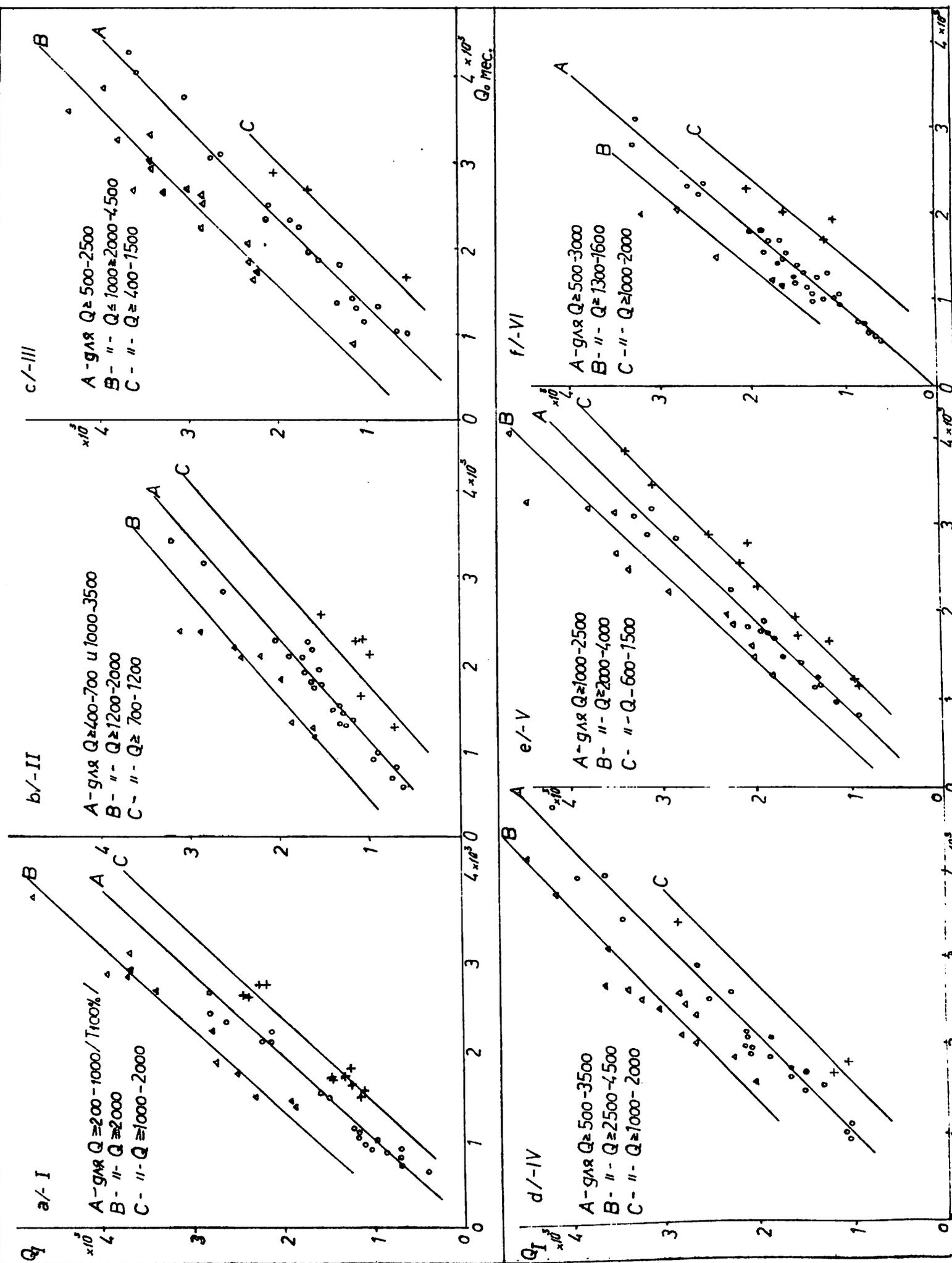
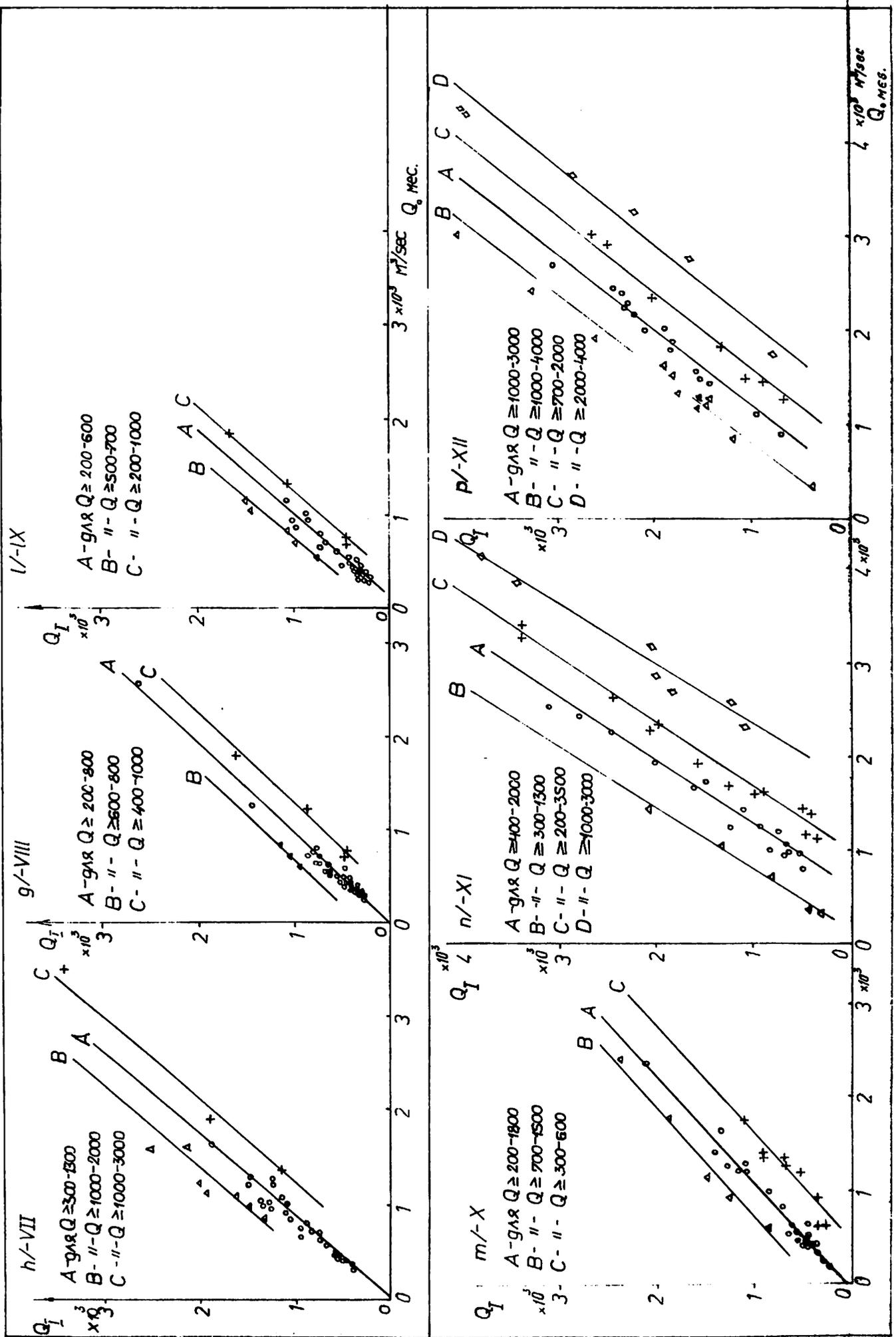


Рис.5. Зависимость между средними декадными расходами в первом декаде  $Q_I/Q_0$  и сред. месч. расх  $Q_0$  мес./



На основании определенного числа точек, и в зависимости от месяца в год, их число бывает разное. Как правило, корреляционная прямая "А", которая в большинстве случаев обозначает среднюю корреляционную прямую, имеет больше всего точек. Например, в первой декаде июля она имеет 30 точек, прямая "Б" - 7 точек и "Ц" три точки.

Если для того же месяца сделать прогноз расхода на 20 дней вперед на следующих 40 лет, можно с уверенностью сказать, что при использовании одной прямой "А" в 30 случаев будет точный прогноз расхода, а в 10 случаев с погрешностью от  $\pm 10$  до 20%. Это можно сказать и для некоторых других месяцев, например, июнь, август, сентябрь, октябрь и другие.

Все же при использовании корреляционных прямых встречаются определенные затруднения, когда и какую прямую, в определенной ситуации использовать. В настоящее время нет определенного правила по решению этого вопроса. В некоторых случаях разницы, получаемые по всем трем прямым могут быть настолько значительными, что результаты могут оказаться полностью неправильными.

Чтобы и этот вопрос можно было решить в некоторой степени, необходимо параллельно со средними декадными расходами рассматривать и их характер, в первую очередь продолжительность периода и особенно соотношение к нормальной величине (рис.6).

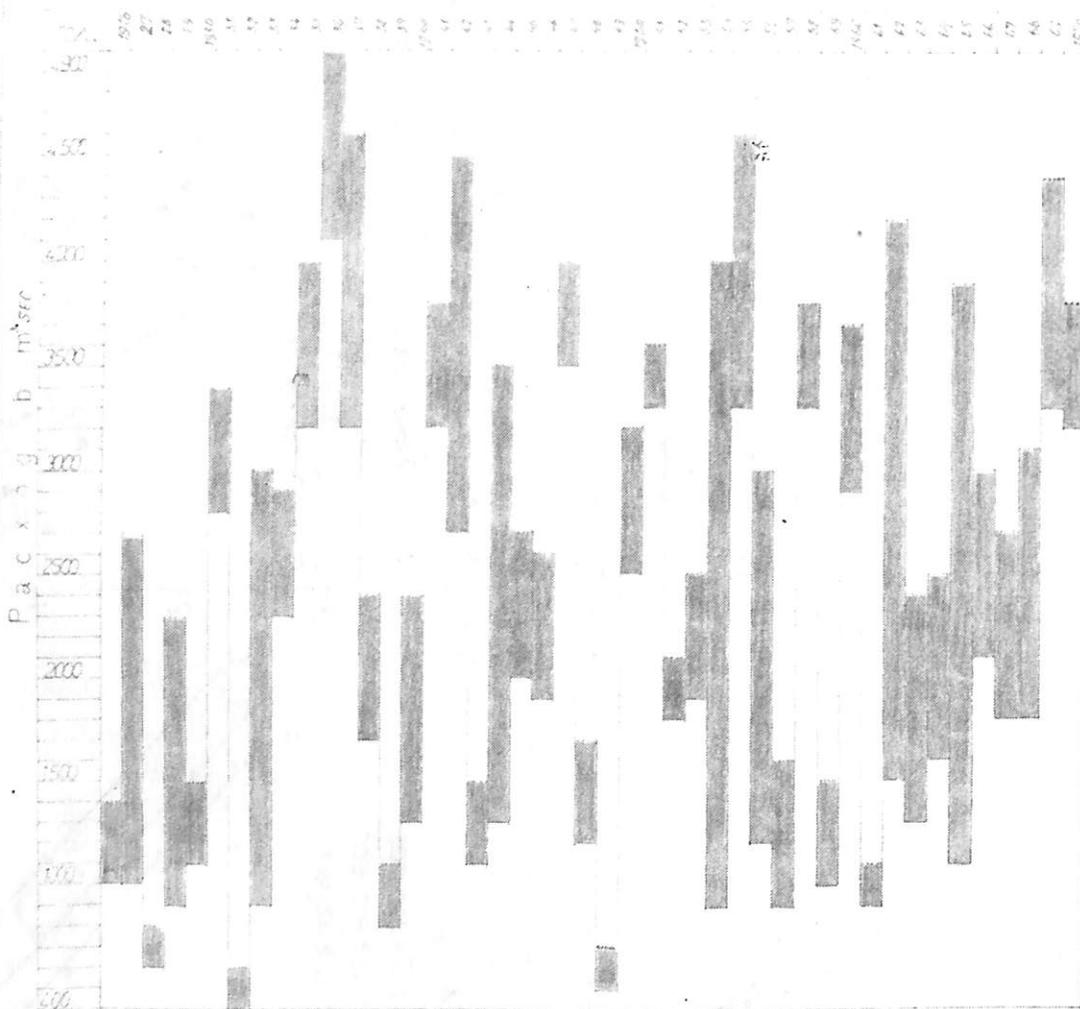


Рис.6. Диаграмм длительностью расходов в первой декаде марта  
 ..... Q<sub>1%</sub> длител. — Q<sub>100%</sub> длител.

В большинстве случаев, большому расходу в первой декаде определенного периода времени соответствуют или предшествуют низкие или средние расходы в третьей декаде или же большие месячные расходы. Покажем это практически на следующем примере.

Возьмем первую декаду в январе (рис.4а), где зависимость  $Q_1 = f(Q_{mes})$  предшествовала трем прямым (А, Б, Ц). Согласно очередности и периода времени расхода в первой декаде в периоде с 1926 - 1965 гг, (40 лет), корреляционной прямой "А" относятся расходы величиной  $200 - 1\ 000\ м^3/сек$  временного периода  $Q_{100\%}$ , прямой "Б" все расходы  $Q \geq 2\ 000\ м^3/сек$ , а "Ц"  $\geq 1\ 000 - 2\ 000\ м^3/сек$ , также с  $Q_{100\%}$ . Очередность декадных расходов данного рода приведена на рис.6 (первая декада в марте).

В связи с расположенными данными по декадным расходам в периоде с 1966 - 1973 гг, (8 лет), произведено действие и результаты показаны в таблице 2.

Средние месячные расходы, полученные двумя способами для января:

Таблица 2

Способ	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
Корреляцией	2040	1540	2100	1520	1800	1600	960	910
Наблюдением	1900	1750	2200	1520	3850	1960	950	901
$\Delta Q$	+7%	-11%	-4%	$\pm 0.0\%$	-53%	-19%	+1%	+1%

Сопоставляя данные из таблицы 2 (прогнозные наблюдения) можно сделать вывод, что результаты удовлетворяют. Исключение составляет 1970 год, который в отношении уровня воды считается особым годом, а по циклическому расходу р.Сава, и особенно по обеспеченности вод, такие расходы бывают в среднем один раз в 15 - 17 лет.

Вторым примером служит первая декада июля (рис.4 и 5), в которой средние расходы и средние месячные расходы также представлены тремя корреляционными прямыми (таблица3). Для получения средних месячных расходов использована лишь одна прямая "А".

Средний месячный расход в июле, полученный двумя способами

Таблица 3

Способ	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973
Корреляцией	840	900	680	900	1480	540	560	700
Наблюдением	862	1110	654	1110	1490	548	1320	708
$\Delta Q\%$	-2%	-19%	+4%	-19%	-0.5%	-1.5%	-58%	-1%

В следующем способе использована зависимость  $Q_1 = f(mes)$ , где взяты все три прямые вместе т.е. прогнозируются средние месячные расходы в пределах огибающей зависимости  $Q_1 = f(Qmes)$ , которые в большинстве случаев обозначены прямыми "Б" и "Ц". Например, ведется месячный прогноз в пределах 1 000 - 1 400 м<sup>3</sup>/сек или от 1 600 - 2 200 м<sup>3</sup>/сек. Для первой декады сентября, когда средний месячный расход  $Q_1 = 800$  м<sup>3</sup>/сек, соответствующий среднему месячному расходу по прямым "Б" и "Ц" будет  $Qmes = 600 - 1\ 000$  м<sup>3</sup>/сек.

В связи с этим ставится вопрос, нужно ли всегда дожидаться первой декады в месяце, т.е. ее конец, чтобы после этого вести прогноз расхода на 20 дней вперед. Ответ простой и состоит в том, что в данной работе рассматривается только одна первая декада, т.к. действие можно расширить и на вторую и третью декады т.е. для каждого пункта сделать математическую модель, так, чтобы год поделить на 36 частей (36 декад), несмотря на месяц и год. Для каждой декады, согласно предыдущим наблюдениям, составляется отношение с расходами на 20 дней вперед, т.е. с предыдущей декадой на 30 дней. Эту процедуру можно в значительной мере облегчить употреблением вычислительной техники.

Все же, под конец нужно сказать, что данный способ не всегда дает точные результаты, но в комбинации с другими способами значительно может облегчить решение проблемы гидрологического прогноза этого рода. На него лучше всего нужно смотреть как на одну из лучших ориентаций при быстром и приблизительном получении средних расходов на 20 дней вперед для таких больших рек как, например, река Сава и похожих ей рек.

Простейшим употреблением уравнения [11] и данных из таблиц 2 и 3 или графика (рис. 4 и 5) находится средний расход на 20 дней вперед.

Например, средний расход во второй и третьей декадах в январе 1968 года, согласно наблюдениям и измерениям  $Q_{Sr} = 1780$  м<sup>3</sup>/сек и образцу [11], т.е. корреляции  $Q_{Sr} = 1760m^3/sec$  или в июле 1971 года, средний расход во второй и третьей декадах, полученный таким же способом, относится как 515 : 510 м<sup>3</sup>/сек.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Евджевич В. "Гидрология", часть 1, Институт "Ярослав Черный" Белград, 1956 г.
2. Вуевич Р. "Климатологическая статистика", Научная книга, Белград, 1958 г.
3. Евджевич В. "Стохастические процессы в гидрологии" (перевод группы авторов с английского языка), Сараево, 1974 г.
4. Радакович М. "Графоаналитический метод определения параметров кривых распределения", (Водопривреда - водохозяйство) №13 - 14, 1971 г.
5. Союзный Гидрометеорологический завод: гидрологическое изучение реки Сава, Белград, 1969 г.
6. Республиканский Гидрометеорологический завод: Источниковые данные для реки Сава.

WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE HYDROLOGISCHER PROGNOSEN

M. Podani

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

М. Подани

Zusammenfassung:

Ein in der Fachliteratur weniger behandeltes Problem ist der wirtschaftliche Einfluß der hydrologischen Vorhersage für die Nutznießer.

Der wirtschaftliche Einfluß der Vorhersage kann nach wasserwirtschaftlichen Kriterien in folgende wichtige Kategorien klassifiziert werden:

- Schutz gegen die zerstörenden Effekte des Wassers;
- Schutz gegen Umweltverschmutzung und -degradierung;
- Schutz gegen Trockenperioden;
- Optimale Bewirtschaftung der Stauseen insbesondere in Trocken- und Hochwasserperioden;
- Höhere Ausbeute an elektrischer Energie;
- Verminderung der Gewässerverunreinigung;
- Entsprechende Dimensionierung der hydrotechnischen Bauten;
- Korrekte Stellung der sozial-ökonomischen Objekte im Verhältnis zum Wasser.

Einige dieser Gesichtspunkte, einzeln behandelt, sind Gegenstand einiger Fachpublikationen und werden von den internationalen Fachorganisationen, WMO und UNESCO (Internationales Hydrologisches Programm) berücksichtigt.

Für diese Konferenz über Vorhersagen an der Donau halten wir einige wirtschaftliche Effekte der hydrologischen Vorhersagen im Kampf gegen die zerstörenden Effekte des Wassers und für den Schutz der Umwelt für wichtig.

Hier wird der Versuch gemacht, die Probleme zu systematisieren und die wirtschaftlichen Effekte der Vorhersage zu berechnen.

Die Überschwemmungen sind mit der Gesamtheit der negativen Effekte Naturerscheinungen oder Zufallerscheinungen, die oft katastrophalen Charakter haben. Sie können zu Menschenopfern führen, zu großen materiellen Schäden, haben einen unheilvollen Einfluß auf die Umwelt, stören den normalen Verlauf des Lebens der Einwohner, die meistens ohne Unterkunft, Kleider, Nahrungsmittel, Trinkwasser und sehr oft auch ohne Verbindung mit den anderen Ortschaften bleiben.

Unter diesen Gesichtspunkten ist die Vorhersage und das Vorkennen der hydrologischen Größen, die Zerstörungen verursachen, sehr wichtig, insbesondere um den Überraschungseffekt zu beseitigen und im Voraus bestimmte Schutzmaßnahmen treffen zu können.

Eine erste statistische Feststellung ist folgende: mit der sozialwirtschaftlichen Entwicklung eines Territoriums und mit wachsendem Einfluß des Menschen auf die Natur wachsen auch die von Überschwemmungen verursachten Verluste bei den gleichen hydrologischen Parametern der Hochwasserwelle. Dieses ist beeinflusst durch die wachsende Anzahl und Bedeutung der in Überschwemmungsgebieten befindlichen Objekte, durch den angenommenen Risikofaktor bei der Dimensionierung der hydrotechnischen Schutzbauten und durch die Wiederverteilung des Wasservorrates. Aus diesem Grunde wird der Schutz gegen Überschwemmungen in den dicht bevölkerten Gebieten mit intensiver Industrie und Landwirtschaft ein immer komplexeres und kostspieligeres Problem, welches eine gute Organisation benötigt, sowohl für die vorbereitenden wie auch für die operativen Maßnahmen in der Hochwasserperiode.

Um die ökonomische Funktion der hydrologischen Vorhersage (im allgemeinen der hydrometeorologischen Vorhersage) berechnen zu können, ist es notwendig, die direkten und indirekten negativen Effekte der Überschwemmungen zu klassifizieren. Die Kenntnis dieser Effekte hat besondere Bedeutung für entsprechende Schutzmaßnahmen und ist Grundlage für ökonomische Berechnung der Dimensionen für hydrotechnische Schutzbauten sowie auch für eine zutreffende Wahl der Bewirtschaftung in den Hochwasserperioden. Gleichzeitig rechtfertigt die Kenntnis der direkten und indirekten Verluste eine zutreffende Wahl für ein entsprechendes Informations- und Entscheidungssystem.

Der Begriff "negative Effekte der Überschwemmungen" umfaßt eine ganze Anzahl wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer negativer Folgen. Ein vereinfachtes Schema der negativen Effekte der Überschwemmungen wird in Abb. 1 gezeigt; es wird in der Praxis des Zentralaussschusses für Schutz gegen Überschwemmungen in Rumänien benutzt, sowie auch für Gewässerübersichtsarbeiten. Diese Klassifizierung kann in verschiedenen Klimazonen und für einzelne Objekte angepaßt und ergänzt werden.

Wie aus Abb. 1 ersichtlich ist, werden die Verluste in drei große Gruppen eingeteilt: wirtschaftliche, soziale und ökologische. Die wirtschaftlichen Verluste (Vernichtungen) werden in direkte und indirekte Verluste eingeteilt und können physisch (quantitativ) oder finanziell (als Wert) ausgedrückt werden.

Uns vorliegende Daten zeigen, daß es sich regelmäßig um Verluste aus der ersten Gruppe handelt, also wirtschaftliche und insbesondere direkte Verluste. Die indirekten Verluste sind sehr schwer zu berechnen und sind meistens wegen den vielen Verbindungen in der Nationalwirtschaft unvollständig geschätzt. Die soziale und ökologische Seite dieses Problems wird regelmäßig vernachlässigt und wird behoben durch die Anstrengung der betroffenen Bevölkerung für die Normalisierung des Lebens.

In unserer Praxis benutzen wir ein normiertes System für die Verbuchung der direkten Verluste, hinsichtlich betroffener sozialwirtschaftlicher Objekte und des Schädigungsgrades, physisch und wertlich ausgedrückt. Sie enthalten einen großen Bereich von Gütern, von Wohnungen und landwirtschaftlichem Boden bis zu verlorenen Tieren. Außerdem wird ein Vorausschätzungssystem der direkten potentiellen Verluste benutzt, welches an gewisse hydrologische Daten gebunden ist, die in den Jahresschutzplänen der Komitee enthalten sind. Diese Jahrespläne haben zur Grundlage die Schutzpläne aller Objekte, die betroffen werden können.

Für die indirekten Verluste werden die Schäden in Rechnung genommen, die dem Stillstand der industriellen Einheiten, der Minderung des Exportes und der Störung des Transportes zuzuschreiben sind, sowie auch die Ausgaben für Schutzaktionen und Wiederaufbau der zerstörten oder beschädigten Objekte.

Zur Zeit wird ein Informationssystem für Probleme an den Gewässern vervollständigt, das eine große Anzahl von gewässerkundlichen Daten, einschließlich der verursachten Verluste, enthält. Bis jetzt hatten die Verzeichnisse den klassischen Charakter der Katasterregister. Dieses Verzeichnissystem erlaubt eine Verarbeitung der Verluste nach Kategorien, nach Flußgebieten, nach Flußläufen oder nach charakteristischen hydrologischen Größen (nach der Bedeutungsklasse des Objektes).

Hinsichtlich der ökologischen Effekte der Überschwemmungen ist es wichtig, folgendes zu erwähnen:

- Verunreinigung des Oberflächen- und Grundwassers mit organischen und anorganischen Substanzen und entsprechende Nutzungsminderung für die Gewinnung von Trinkwasser und für technologische Zwecke;
- Veränderung der Landschaft und das Auftreten von Umweltschäden durch die Vernichtung der Pflanzenwelt, durch veränderte Geschiebefracht, durch Auswirkungen der Erdölproduktion usw.;
- Auftreten von Vernässungsgebieten; dies ist ebenfalls ein negativer Effekt für die Umwelt infolge Änderung der Bodenstruktur, der Bodenversalzung, dem Ansteigen des Grundwasserspiegels und der Stauung von Regenwasser in Vertiefungszonen;

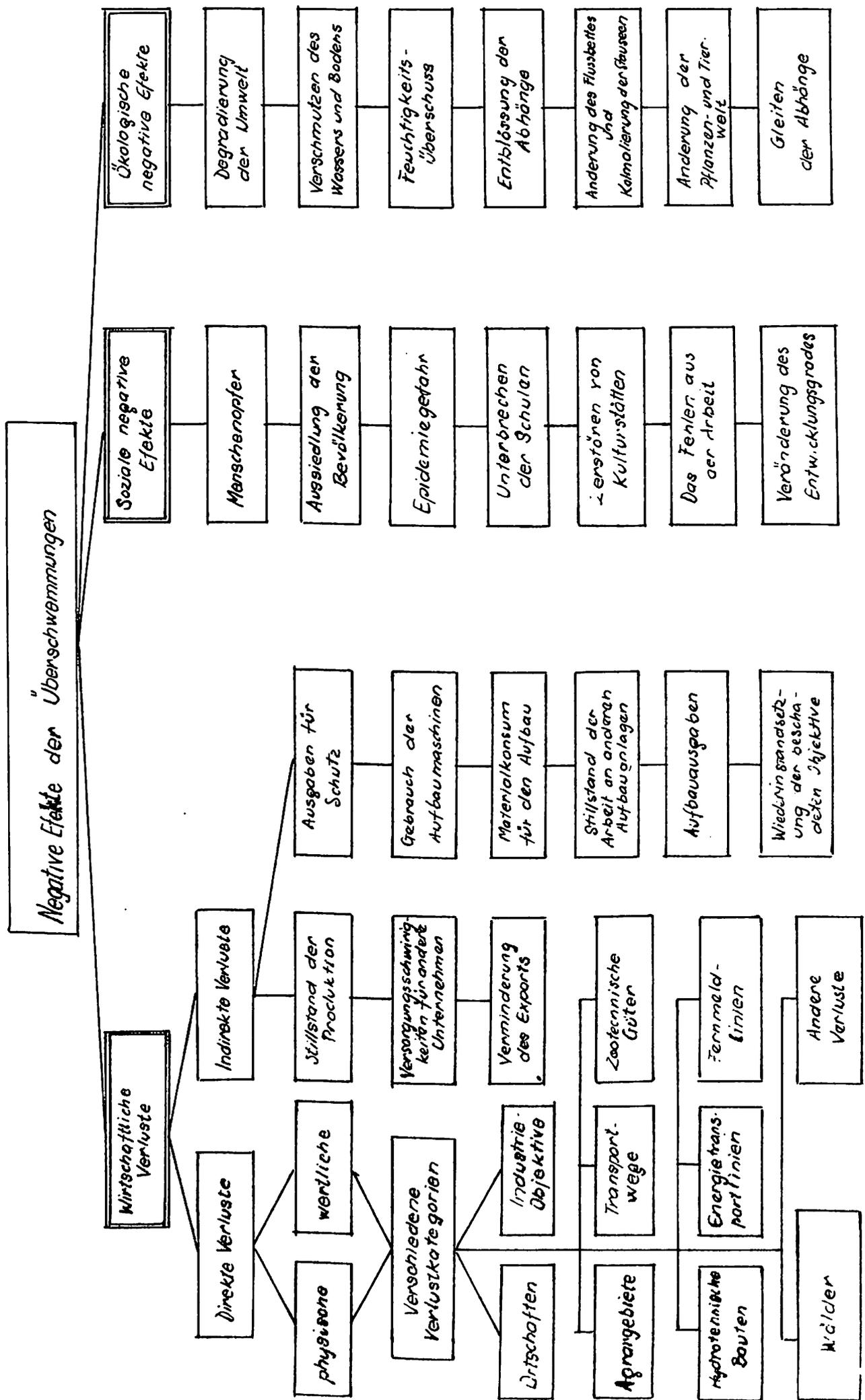


Abb. 1: Klassifizierungsschema der negativen Effekte der Überschwemmungen

- Erosionsanrisse an Abhängen und die Abschwemmung fruchtbarer Bodenmaterials in das Flußbett, insbesondere an den mit Hackpflanzen bebauten Abhängen, welche den Schutzeffekt vermindern (Mais, Sonnenblumen u.a.);
- Hangrutschungen durch Bodenvernässung bis zu tieferliegenden Tonschichten sind ebenfalls sehr ernste und verwüstende Effekte; solche endemische Zonen sind sehr schwer zu stabilisieren;
- Veränderung der morphologischen Verhältnisse in den Flüssen durch Akkumulation bei großer Geschiebefracht oder durch Erosionen bis zum Grundgestein; hierdurch ergeben sich viele Fragen für hydrotechnische Bauten und Überquerungsbauten an den Flüssen;
- Schnelle Kolmatierung der Stauseen durch große Geschiebefrachten in den Hochwasserperioden, sowie auch durch die geringere Abflußmöglichkeit im Flußbett;
- Vorkommen von Stechmücken, Raupen und anderen schädlichen Insekten in Feuchtigkeitszonen.

Der Zusammenhang zwischen den von Überschwemmungen hervorgerufenen Verluste und den hydrologischen Parametern hat eine besondere Bedeutung. Der physische oder ökonomische Wert der verursachten Verluste einer Überschwemmung irgendeines Objektes  $P_i$ , entsprechend der hydrologischen Größe  $H$ , ist von diskreter Natur. Der Ausdruck ist abhängig auch von der Dauer  $t$  des Hochwassers, demnach gilt:

$$P_i = f_1(H, t)$$

In den Fällen, in denen die Dauer des Hochwassers konstant genommen werden kann, erhalten wir:

$$P_i = f_2(H)$$

Summieren wir die Verluste für  $n$  Objekte, die an demselben Fluß liegen (oder nur an einem bestimmten Abschnitt des Flusses) erhalten wir den gesamten Verlust:

$$P_t(H) = \sum P_i(H)$$

In diesem Falle ist  $H$  der hydrologische Parameter, der in Betracht genommen wurde. Er muß aber dieselbe Bedeutung für alle Objekte haben. Am einfachsten ist es, die größte Hochwasserwelle zu betrachten (nach Abfluß oder Wasserstand) oder, wie es bei uns üblich ist, Abfluß oder Wasserstand mit einer gewissen Frequenz entsprechend der Bedeutungsklasse der Objekte. Gewöhnlich werden in Betracht genommen die Erscheinungswahrscheinlichkeiten von  $p = 5\%$ ,  $1\%$  oder  $0,1\%$ .

In diesem Falle erhalten wir:

$$P_t(H_{p\%}) = \sum P_i(H_{p\%})$$

Die graphische Darstellung des Zusammenhanges zwischen Verlusten und hydrologischen Parametern statistisch oder durch charakteristische Größen ausgedrückt, ist in der Abb. 2 gezeigt.

Den Wert für  $H_{p\%}$  erhält man meistens aufgrund der freien Wasserspiegelkurve bei einem Abrollen entlang des Flusses einer Welle mit einer Frequenz von  $p\%$ . Zu diesem Zweck gibt es schon mathematische Modelle und Programme für die Rechenmaschinen des administrativen Wassersystems.

Man kann leicht erkennen, daß die totale Verlustveränderung auf einem Flußabschnitt eine parabolische Form des Typs

$$P_t = a_1 H_p^2 \quad \text{oder} \quad P_t = a_2 Q_p^2$$

hat.

Die Veränderung der Individual- und Gesamtverluste durch Überschwemmungen in Abhängigkeit von charakteristischen hydrologischen Größen

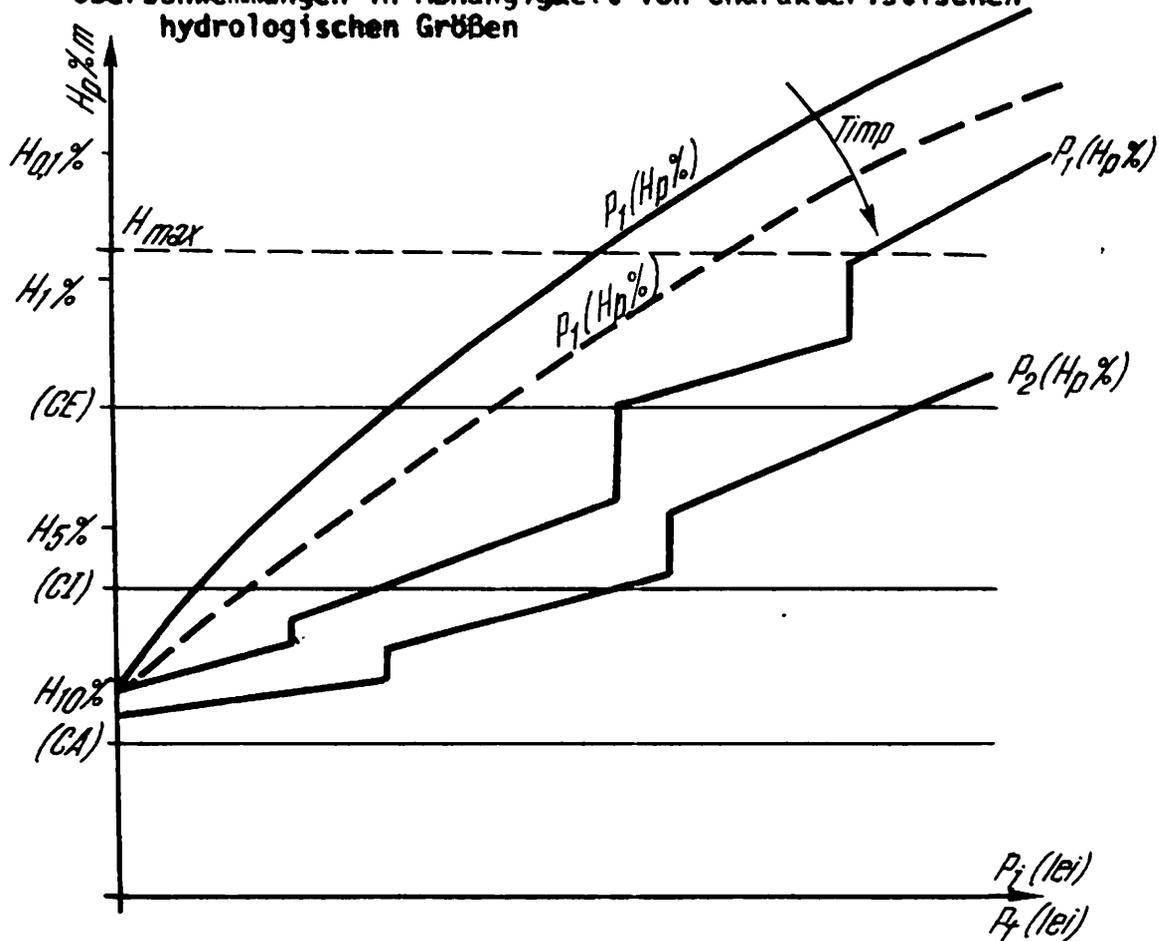


Abb. 2

Die Veränderung der Gesamtverluste in Abhängigkeit der charakteristischen Abflusssmengen und der Zeit.

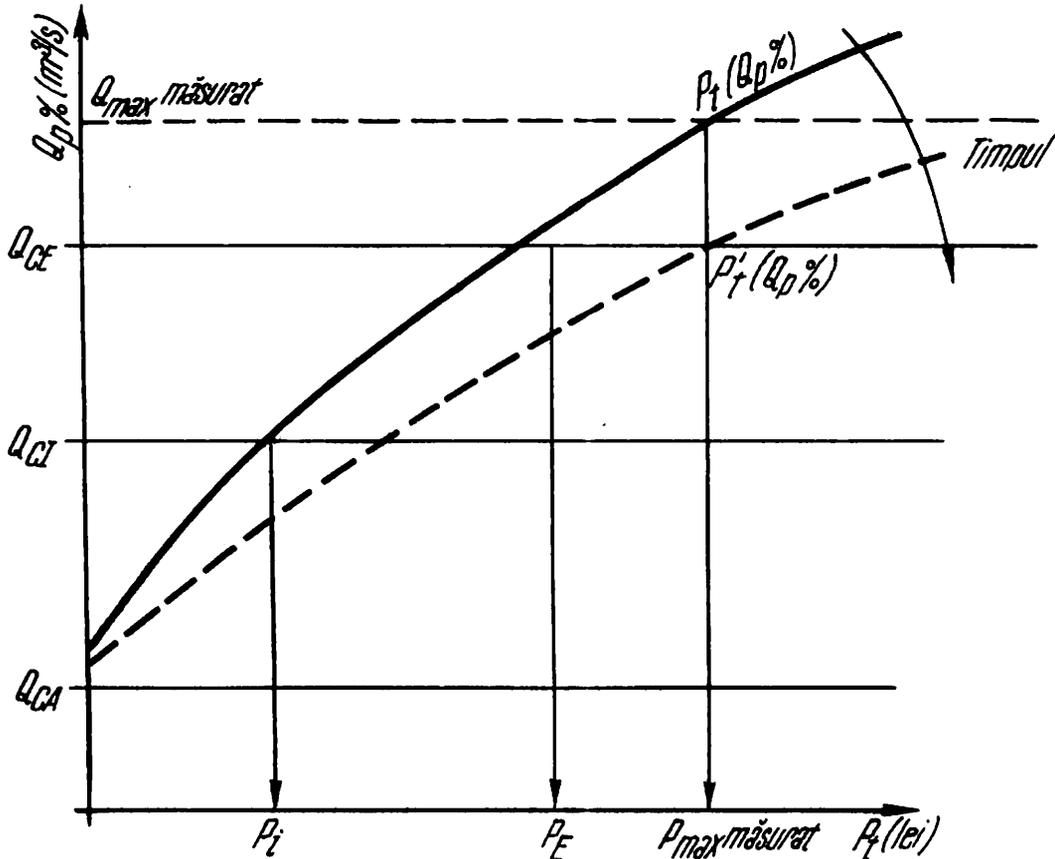


Abb. 3

Meistens werden Wasserstände verwendet; sind jedoch Wasserstände durch Stauseen beeinflusst, werden Abflüsse verwendet. Die Parameter  $a_1$  und  $a_2$  sind von der Dauer der Welle abhängig. Die wachsende Neigung der Werte dieser Parameter im Einklang mit der Dauer und Zeit der Welle ist in der Abb. 3 und 4 dargestellt. Das jährliche Ansteigen des Parameters  $a$  infolge der Anzahl und Bedeutung der betroffenen Objekte ist proportional dem mittleren Prozent der wirtschaftlichen Entwicklung des entsprechenden Gebietes; und bei den Bedingungen unseres Landes liegt die Größenordnung zwischen 10% und 15%.

Auf diese Weise sind die Mittelverluste unseres Landes in den letzten zwei Jahrzehnten von etwa 2 Milliarden Lei pro Jahr auf 8 Milliarden Lei pro Jahr angestiegen.

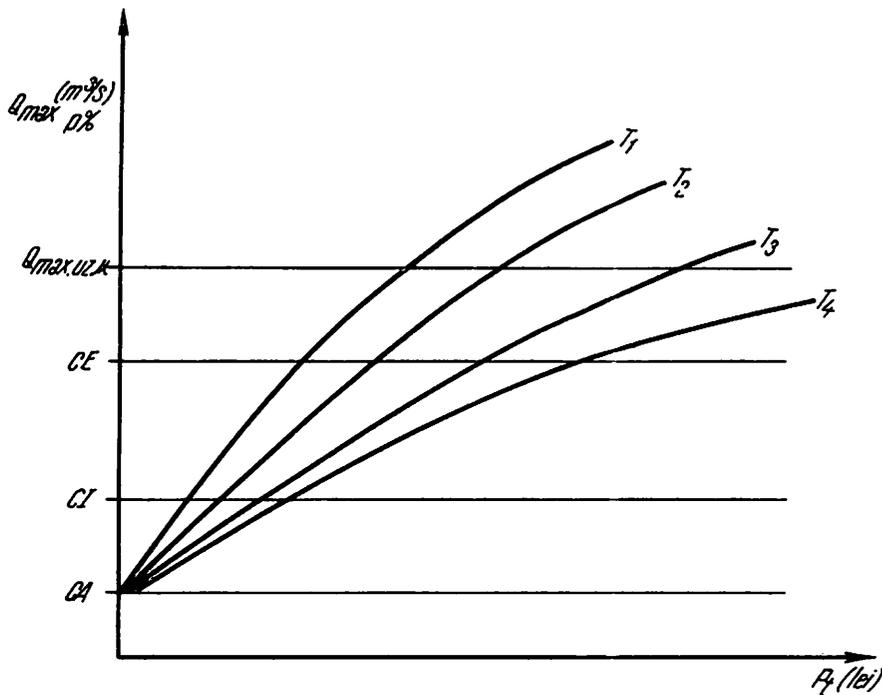


Abb. 4: Die Veränderung der Gesamtverluste in Abhängigkeit der charakteristischen hydrologischen Größen und die Dauer der Welle

Die Daten über Verluste können auch statistisch verarbeitet werden. Somit kann ein Mittelwert der Verluste für einen Zeitabschnitt und die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Verlustes berechnet werden. Man kann ein  $p\%$  Probabilität für Verluste definieren und eine Verteilungsfunktion desselben Typs wie für hydrologische Größen verwenden.

Die geringe Anzahl von Daten und die Veränderung der Anfangsbedingungen machen diese Art von Verarbeitung schwierig und unbefriedigend.

In der Abb. 5 wird die Veränderung der summierten Verlustkurve dargestellt, wenn aufgrund einer genügend langfristigen hydrologischen Vorhersage Vorbeugungs- und Schutzmaßnahmen getroffen werden. Auf diese Weise wird eine Minderung der Verluste mit einem Wert von  $P_t$  festgestellt. Dieser Wert ist unter den Bedingungen unseres Landes ungefähr 30% der Totalverluste. Diese Prozentzahl hängt ab von der Wirksamkeit der Vorhersage, ausgedrückt durch die Zeitdauer der Vorhersage und von ihrer Präzision sowie auch von den Vorbeugemaßnahmen.

Die Veränderung der Gesamtverluste mit (1) und ohne (2) Schutzmaßnahmen auf Grundlage einer hydrologischen Vorhersage

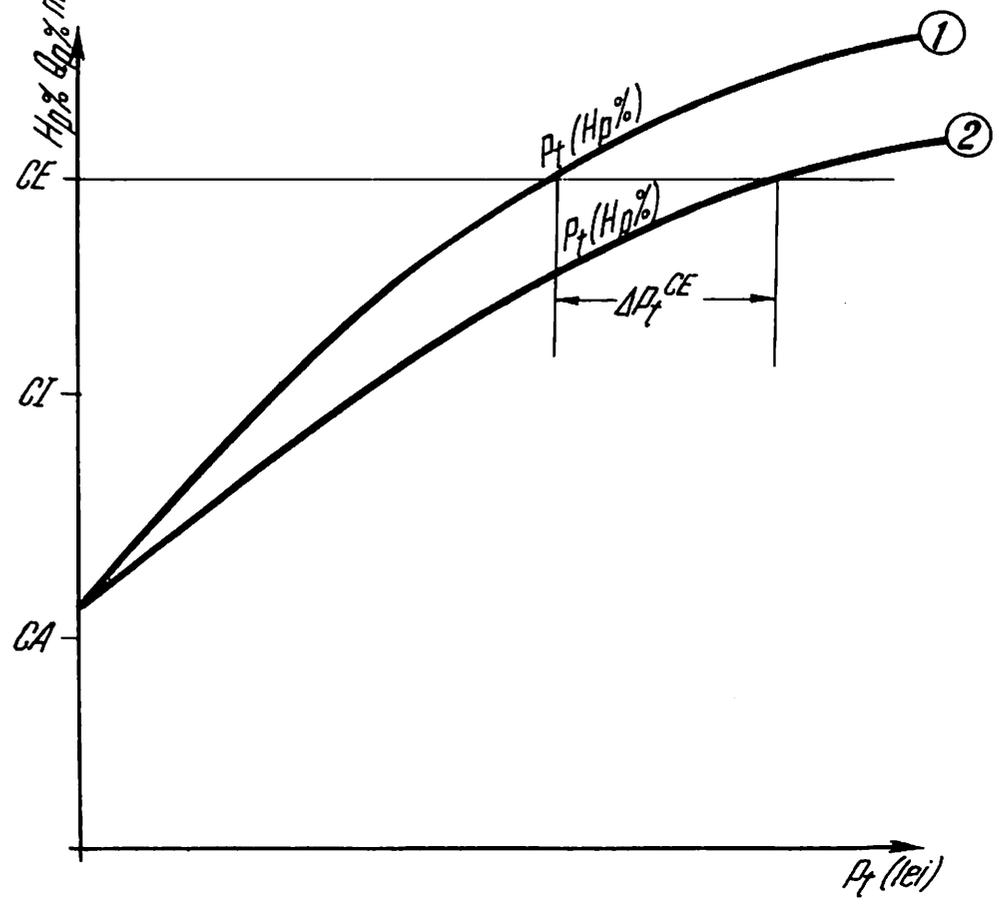


Abb. 5

Schaubild der optimalen Dimensionierung der hydrotechnischen Bauten für die Minimalisierung der totalen Verluste

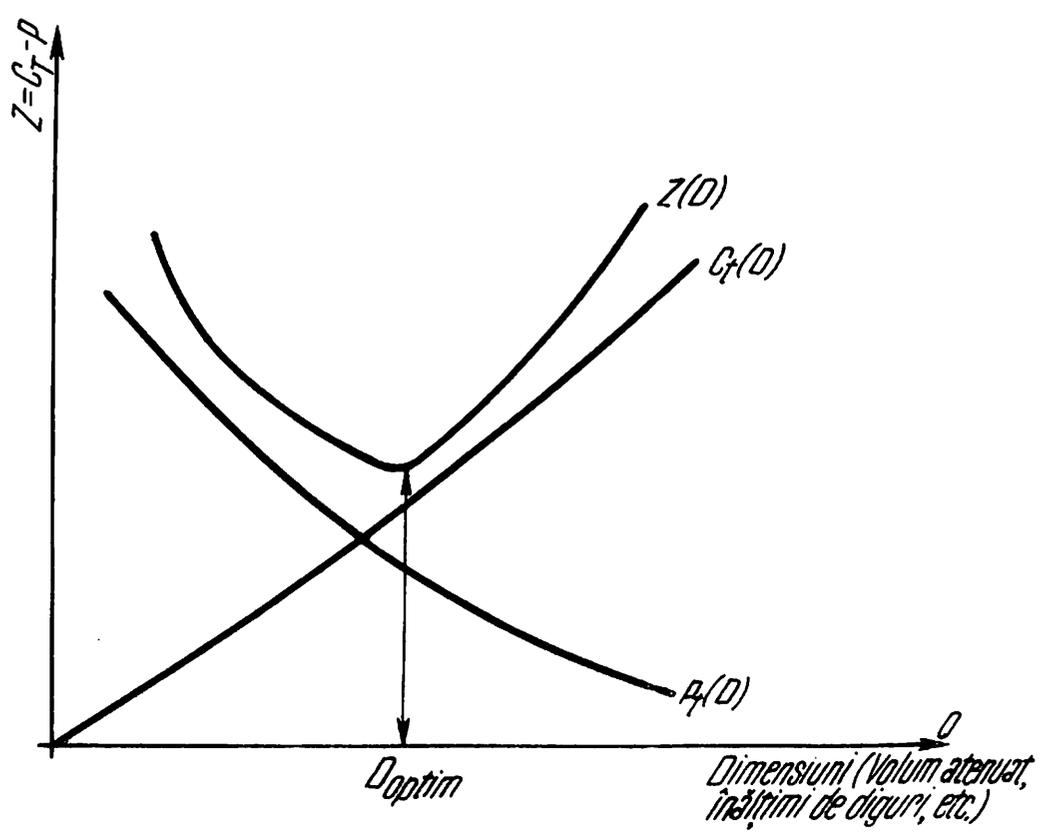


Abb. 6

Auf diese Weise kann

$$\Delta P_t = f(\tau_p, \epsilon, M) \text{ ausgedrückt werden, wobei}$$

$\tau_p$  = Zeitdauer der Vorhersage  
 $\epsilon$  = Präzision, in Abweichungsprozenten ausgedrückt und  
 $M$  = Vorbeugemaßnahmen sind.

Es ist offensichtlich anzunehmen, daß die Ausarbeitung einer hydrologischen Vorhersage und die Vorbeugemaßnahmen eine gewisse Anstrengung  $C_0$  Ausgaben für den Schutz erfordern, welche folgende Bedingung befriedigen muß:

$$\Delta P_t > C_0$$

Diese Bedingung trifft sicher zu, wenn es sich um das Retten von Menschenleben handelt.

Aus der Reihe der Vorbeugemaßnahmen aufgrund einer hydrologischen Vorhersage sind folgende die wichtigsten:

- Entleeren der Stauseen abhängig von der Wassermenge der Welle oder des Wasservorrates im Schnee und der Frühjahrsregen. Der Effekt dieser Maßnahme ist sehr bedeutend, leider wird ihm nicht in allen Fällen die nötige Aufmerksamkeit gewidmet.
- Vorsorgliche Entleerung entsprechend den Umleitungsmöglichkeiten für das Hochwasser in Verbindung mit der hydrologischen Situation im Flußgebiet.
- Überwachung und Verstärkung der Schutzarbeiten, besonders der Dämme und anderer passiver Schutzbauten,
- Vorbereitung und Maßnahmen, um Vermögenswerte aus den Überschwemmungszonen zu räumen, auf Terrassen zu heben oder zu verankern,
- Aussiedlung der Bevölkerung und des persönlichen Eigentums aus den gefährdeten Zonen und ihr Unterbringen.
- Mobilmachung aller Hilfsmittel für einen operativen Schutz (Ausrüstungen, Transportmittel für Wasser, Festland und Luft),
- Zuschuß für Treibstoff und Versorgung mit elektrischer Energie aller Pumpstationen und der Anlagen für Wasserentleerungen,
- Maßnahmen für eine gute Versorgung der Bevölkerung und eine ärztliche, krankheitsverhütende Fürsorge.

Die dargestellte Methode hat als Grundlage eine direkte Berechnung der Verluste, welche durch eine zeitliche Verlängerung eine Fortschreibung der Verluste ermöglicht, verbunden mit den nachher ergriffenen Schutzarbeiten.

Aus Mangel an ausreichenden Daten über Verluste können auch indirekte Berechnungen angestellt werden, insbesondere für Wellen von einer sehr seltenen Frequenz. In diesem Fall benützt man die Parametermethode, die in der Projektierungspraxis sehr bekannt ist.

Falls wir die potentiellen Verluste der Landwirtschaft, die auf eine Überschwemmung zurückzuführen sind, bestimmen wollen, suchen wir eine Beziehung folgender Form:

$$P_a = f(s, h, t, p_a, \alpha), \text{ wobei bedeuten:}$$

- $P_a$  - Verlust in der Landwirtschaft  
 $s$  - betroffene Oberfläche  
 $h$  - Wasserhöhe  
 $t$  - Dauer der Überschwemmung  
 $p_a$  - Mittlere Produktivität (Produktionswert)  
 $\alpha$  - Prozente der Schädigung.

Für wirtschaftliche Unternehmen können Verluste nach einer Beziehung folgender Form berechnet werden:

$$P_k = \sum S_p + \sum C_d + \sum C_a + \sum S_f + \sum C_r \text{ wobei bedeutet:}$$

- $\sum S_p$  - Totalwert der nichtgelieferten Ware auf Innen- und Außenmarkt
- $\sum C_d$  - Summe der Zusatzausgaben für die Produktion
- $\sum C_a$  - Summe der Ausgaben für den Schutz des Objektes
- $\sum S_f$  - Summe der Ausgaben für Bestandverluste
- $\sum C_r$  - Ausgaben für die Wiederherstellung und Beseitigung der Folgen der Überschwemmung.

Diese Beziehung ist nur dann anwendbar, wenn es sich um Objekte handelt, die nicht ganz vernichtet wurden. In diesem Fall wird der ganze Wert des Objektes in die Berechnung einbezogen.

Es sind auch andere Berechnungsmethoden bekannt für die indirekten Verluste, wie zum Beispiel für die Zusatzausgaben für die Ausführung von Aufträgen und anderen Diensten, für Hilfen anderer Unternehmen, durch Importe oder aus Staatsreserven. Falls dies berechnet werden kann, verwendet man einen "Restverlustkoeffizienten". Die empfehlenswerte Methode für die Berechnung der indirekten Verluste ist diejenige, die den Effekt in den anderen Wirtschaftszweigen widerspiegelt. Diese Methode eignet sich für eine mathematische Modellierung auf der Bilanzgrundlage für die verschiedenen Wirtschaftszweige. Sie berücksichtigt die Minderung der Produktion und der größeren spezifischen Ausgaben in den anderen Zweigen als Folge der Überschwemmungen. Bei der Benützung dieser Methode muß man die gegenseitigen Abhängigkeitskoeffizienten eines Objektes gegenüber den anderen kennen und dieses für die ganze Kette der beteiligten Objekte.

Zur Zeit enthält diese Matrixberechnung der Bilanz noch viele subjektive Elemente, und trotzdem bildet sie ein gutes Optimierungs- und Planungssystem.

Daten über die von Überschwemmungen verursachten Verluste werden direkt in technisch-ökonomischen Berechnungen für Projektierung von hydrotechnischen Bauten verwendet.

Eine dieser Methoden ist diejenige, die den wirtschaftlichen Effekt der Schutzarbeit gegen Überschwemmungen mit den vermiedenen Verlusten vergleicht, Verlusten, die wie ein direktes Einkommen betrachtet werden können. Wenn der Vorteil  $\Delta P$  und  $\Delta C$  die Zusatzausgabe für den Bau der hydrotechnischen Bauten als Schutz des Objektes sind, dann kann man das Maximum des Verhältnisses derart suchen:

$$\frac{\Delta P}{\Delta C} = \max. \text{ oder für den Kehrwert } \frac{\Delta P}{\Delta C} \leq T_{rn}$$

wobei  $T_{rn}$  = die nominierte Dauer der Amortisation der Kapitalanlage ist.

Dieses ist die Methode des maximalen wirtschaftlichen Effekts, oder anders benannt, die Methode des zulässigen Gliedes für die Rückgewinnung der Kapitalanlage.

Die Methode dient zur:

- Berechnung des Wirkungsgrades des Informationssystems für hydrologische Vorhersagen und Benachrichtigung sowie für die Modernisierung dieses Systems, um die Dauer der Vorhersage zu verkürzen.
- Bestimmung von Preisen, die von den wasserwirtschaftlichen Unternehmen von den Nutznießern gefordert werden.

Eine andere gut bekannte Methode zur Berechnung des wirtschaftlichen Wirkungsgrades von Schutzbauten, wenn die vermiedenen Verluste bekannt sind, ist jene, die die Totalausgabe minimalisiert, berechnet durch eine Formel:

$$Z = \sum ( C + rI ) = \min., \text{ wobei}$$

C - Jahresausgaben

I - Kapitalanlagen der Schutzarbeit

$r = \frac{1}{T_r}$  der Kehrwert der Dauer der Rückgewinnung der Kapitalanlage ist.

In der Abb. 6 ist eine graphische Darstellung dieser Methode angegeben.

Bei den Verfahren zum Schutz gegen Überschwemmungen spielt das Informationssystem für hydrometeorologische Warnung und Vorhersage eine bestimmende Rolle. Auch die Verbindung dieses Systems mit den Entscheidungsorganen ist wichtig. Der Verlauf der Entscheidungen für den Schutz gegen Überschwemmungen, wird in Abb. 7 als ein zirkulares Schema vorgeführt.

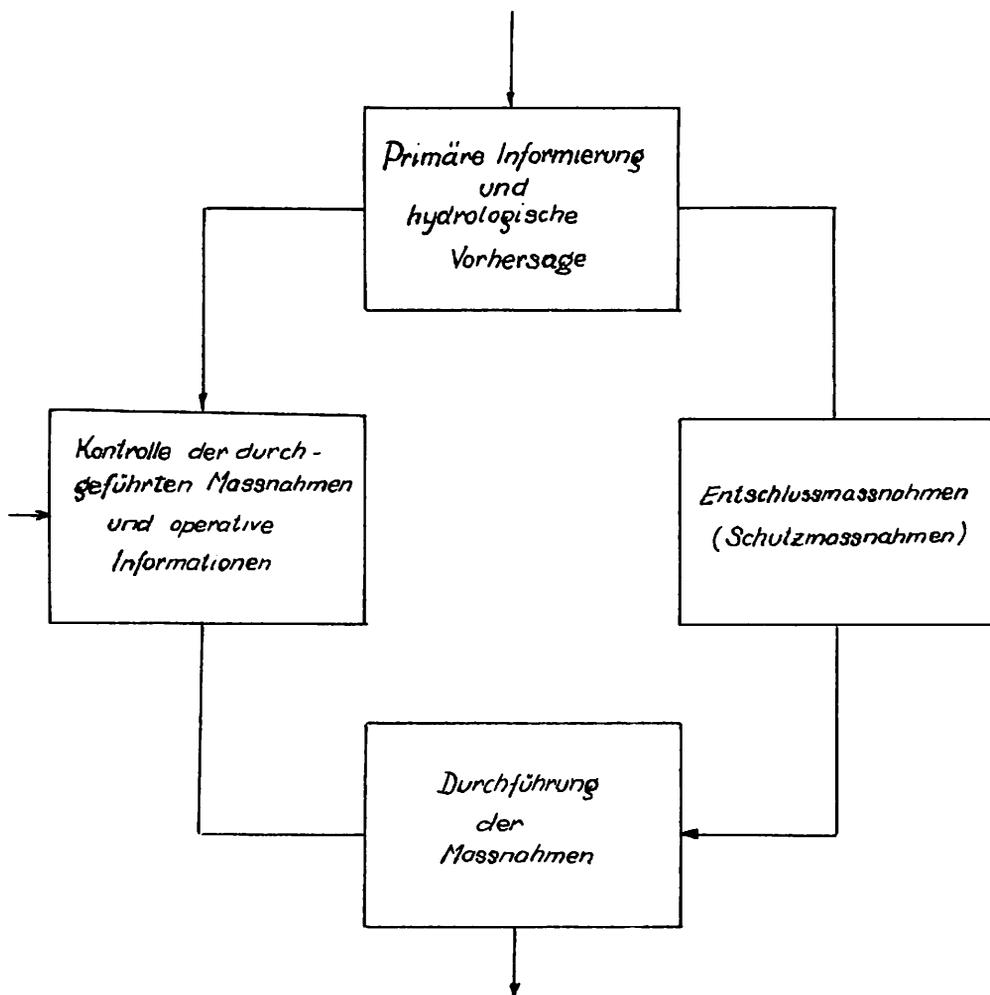


Abb. 7

Prinzipschema für Entscheidungen in Überschwemmungsperioden

Wie man erkennen kann, braucht man für die Bekanntgabe einer Entscheidung ein Anfangsinformationssystem, welches auf eine hydrologische Situation und eine entsprechende Vorhersage gegründet ist sowie auch auf den Zustand der hydrotechnischen Schutzbauten. Diese Informationen werden von den Beschlußorganen empfangen, die meistens Organe der territorial-administrativen Staatsverwaltung oder hydrotechnische Ausführungsorgane sind. Nach der Entscheidung können weitere Informationen zu einer Verbesserung oder Ergänzung der Entscheidung führen.

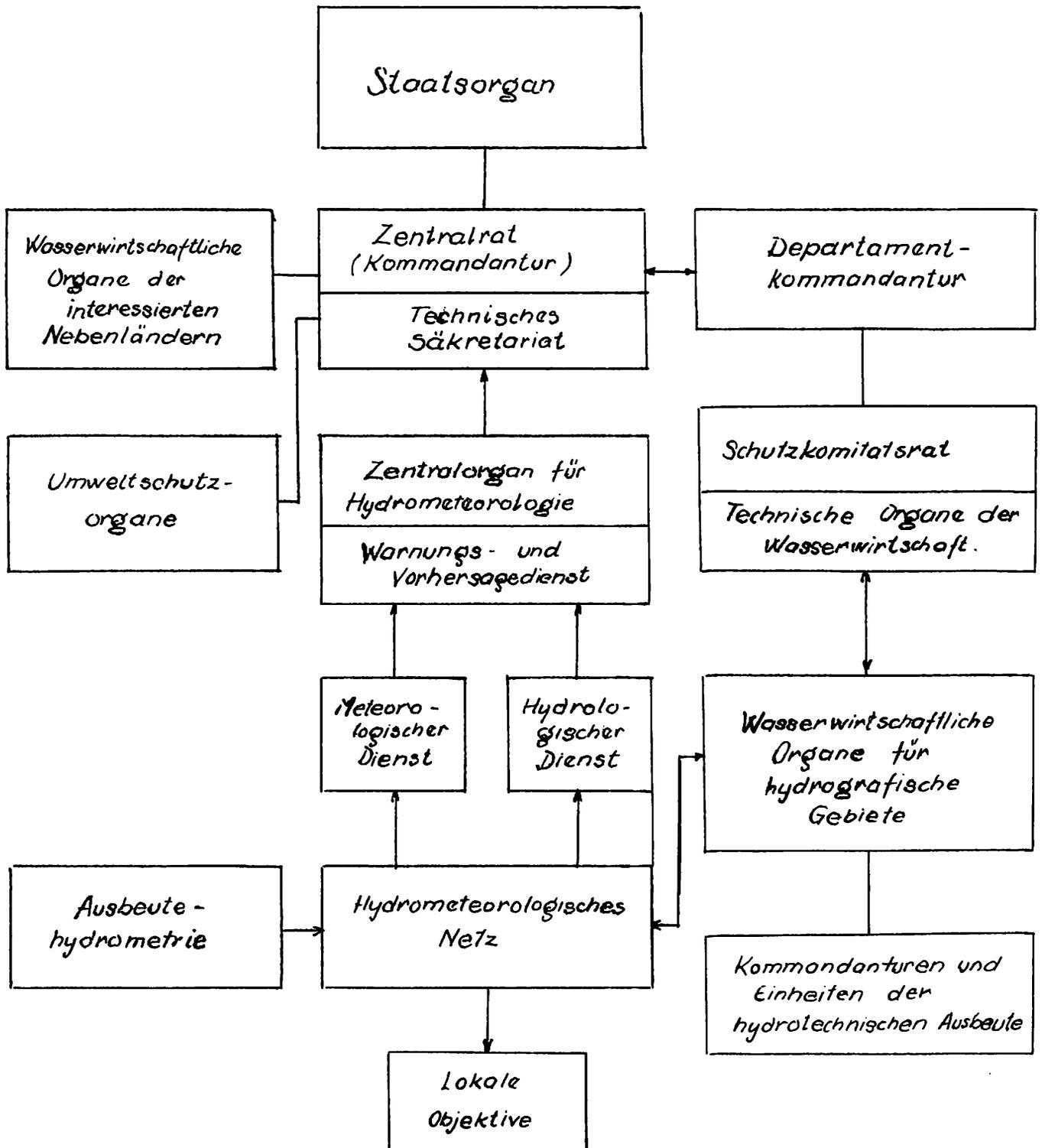


Abb. 8

Prinzipschema des Informationsflusses zum Schutz gegen Überschwemmungen

Ein orientierendes Schema eines Informations-Entscheidungs-Systems, wie es in den Bedingungen unseres Landes benützt wird, ist in Abb. 8 gezeigt.

Im Zusammenhang mit dem Informationssystem und der Entscheidung sind folgende Erklärungen zu geben:

- Jedes Objekt, das in Schutzplanungen erfaßt ist, muß eine Informations-, Warnungs- und Vorhersagequelle besitzen, wenigstens einfache kritische Größen für Regenniederschläge, oder ein Schutzwasserstandsniveau für eine hydrometrische Anlage stromabwärts.
- Das charakteristische Wertsystem für Schutzmaßnahmen muß im Voraus bekannt sein, während die Belegschaft des Wassernetzes ganz genau seine Pflicht kennen muß.
- In den Schutzplänen müssen ganz genaue mittlere Zeiten der Fortpflanzung der gefährlichen hydrologischen Parameter angegeben sein, vom Informationsort bis zum Objekt.
- Dank der geringen Fortpflanzungsdauer der Hochwasserwellen, insbesondere in den oberen Teilen der Flußgebiete, ist ein schnelles und elektrisch unabhängiges Fernmeldesystem notwendig; empfehlenswert sind Funkverbindungen mit genügender Autonomie.
- Die hydrometeorologischen Warn- und Vorhersageorgane müssen über wichtige Daten der hydrotechnischen Bauten, die meistens den natürlichen Abfluß verändern, verfügen. In solchen Fällen ist ein wechselseitiges Zusammenwirken zwischen den hydrometrischen Angaben der wasserwirtschaftlichen Unternehmen und dem hydrologischen Grundnetz erforderlich.
- Die großen Stauseen müssen ein eigenes System zur Erfassung gefährlicher hydrologischer Situationen besitzen, das besser ausgestattet sein muß als dasjenige des hydrometeorologischen Grundnetzes.

Für die Darstellung der Effekte der hydrologischen Vorhersage unter den Bedingungen unseres Landes sind einige Vergleiche erwähnenswert.

Die Mittelwerte der Jahresverluste durch Überschwemmungen war in den letzten fünf Jahren von etwa 6 Milliarden Lei pro Jahr. Der gesamte Preis für Instandhaltung des hydrometeorologischen Netzes und für seine gleichzeitige Entwicklung betrug 100 Millionen Lei.

Der direkte wirtschaftliche Effekt der Schutzmaßnahmen im Vergleich zu einer hypothetischen Situation, in der alles nach Zufall abgelaufen wäre, ist ungefähr 1,8 Milliarden Lei. Dieser Wert enthält gerettete Güter, die geschützte Produktion der Unternehmen und andere berechenbare Werte aus Schutzmaßnahmen; dem Wert sind die Ausgaben für die eigentlichen Schutzarbeiten entnommen.

Daraus kann man schließen, daß eine entsprechende Entwicklung des Warn- und Vorhersagesystems mit einigen Prozenten der verminderten Verluste gedeckt werden kann sowie auch durch eine bessere und zeitigere Warnung.

Hieraus ist ersichtlich, welchen wirtschaftlichen Wirkungsgrad hydrologische Vorhersagen für die Nationalwirtschaft haben können.

#### 4. DISKUSSION

##### Thiess:

Ich möchte Herrn Andjelic fragen:

1. Warum wurde zur Kennzeichnung der Zuverlässigkeit der Korrelationskoeffizienten nicht auch die partiellen Korrelationszahlen verwendet?
2. Welche Beziehung von Professor Alexejew ist verwendet worden?

##### Andjelic:

Zu 1.: Bei der Bildung der Korrelationsmatritze wurden auch alle partiellen Korrelationskoeffizienten berücksichtigt. Sie zeigte, daß den größten Einfluß ("Gewicht") auf die Größe des Ausgangsabflusses im Zeitpunkt  $t + \Delta t$  ( $\Delta t$  - Periode der Vorhersagefrist) an der Meßstelle Bogojewo die Abflüsse an den Eingangs- und Ausgangsmeßstellen am Hauptfluß (Donau) im Zeitpunkt  $t$  haben und daß die Abflüsse des Nebenflusses (Drau) von äußerst geringer Auswirkung sind.

Nebenbei bemerkt, dies ist bei einer solchen Aufgabenstellung das erwartete Resultat, und deswegen sind in der Arbeit die partiellen Korrelationskoeffizienten nicht besonders hervorgehoben worden.

Zu 2.: Das wesentliche dieser Methode, die von Professor G.A. Alexejew für die Analyse des nichtlinearen Regressionsmodells ausgearbeitet wurde, liegt in der Normalisierung und Ausgleichung aller Variablen (der abhängigen und der unabhängigen) und in der Bestimmung der Korrelationskoeffizienten der normierten Variablen. Auf der Grundlage dieser Koeffizienten wird die Korrelationsmatritze erstellt, die die Basis für die nichtlineare Regressionsanalyse darstellt. Eine detaillierte Erläuterung können Sie der bekannten Arbeit von G.A. Alexejew, dem Autor dieser Methode, entnehmen.

##### Thiess:

Ich habe eine Frage an Herrn Ocokolic. Sind die verwendeten oberen und unteren Hüllkurven entlang der Regressionsgeraden einfache Umhüllkurven oder Konfidenzbänder? Wenn es letztere sind, auf welchem Signifikanzniveau liegen sie? Wenn es keine sind, warum wurden sie nicht angewandt?

##### Ocokolic:

Es sind weder einfache Hüllkurven noch Konfidenzbänder. Auf den Zeichnungen 4 und 5 sind Autokorrelationslinien der mittleren (durchschnittlichen) Abflüsse für die erste Monatsdekade ( $Q_1$ ) dargestellt, sowie die mittleren Monatsabflüsse des gleichen Monats aufgrund der Meßdaten für den Zeitraum 1926 - 1965.

Die Meßpunkte bilden insgesamt 3, seltener 4 Linien. Wie sie verwendet werden, ist in meiner Arbeit auf verschiedene Weise dargelegt.

##### Parschin:

Ich möchte Herrn Podani herzlich für seinen aufschlußreichen Vortrag mit den Zahlen über die ökonomische Effektivität der hydrologischen Prognosen in Rumänien danken. Das ist ein sehr wichtiges Thema, das auf den zukünftigen Konferenzen noch weiter entwickelt werden muß. Ich kann hinzufügen, daß in der UdSSR der Erforschung der wirtschaftlichen Effektivität von Prognosen große Aufmerksamkeit geschenkt wird. Ich kann sagen, daß die Ausnutzung von Prognosen in der Wasserkrafttechnik eine wirtschaftliche Sparquote bei der Produktion von Energie von etwa 10% bringt - das ist eine gewaltige Wirkung. Darüber hinaus kann man die wirtschaftliche Effektivität von Abflußprognosen nicht immer taxieren, denn es ist nicht immer bekannt, wie groß der Verlust wäre, wenn es keine Prognose für extreme niedrige Wasserstände oder Hochwässer gäbe.

Podani:

Ich unterstreiche die Notwendigkeit, die wirtschaftliche Effektivität von Prognosen (von hydrologischen und hydrometeorologischen) in Zahlen auszudrücken, und zwar, um das Netz des Informations- und Warndienstes zu erweitern.

Ich habe den ökonomischen Effekt nur unter dem Gesichtspunkt des Schutzes vor Hochwässern und negativer ökologischer Auswirkungen berücksichtigt, aber dieser hat eine Reihe von anderen Ausdrucksformen auf dem Gebiet der intensiven Ausnützung hydrotechnischer Anlagen, wie Professor Parschin in seiner Ergänzung zu meinem Vortrag gezeigt hat.

4. Д И С К У С С И ЯТисс:

Вопрос господину Анджеличу:

1. Почему для охарактеризования надежности коэффициентов корреляции не были применены также частичные корреляционные значения?
2. Какие уравнения профессора Алексева были применены?

Анджелич:

1. При формировании корреляционной матрицы рассчитаны также все частичные коэффициенты корреляции. Она показала, что наибольшее влияние "вес" на величину выходного расхода в момент времени  $t + \Delta t$  ( $\Delta t$  - период заблаговременности прогноза), у водного пункта Богоево, имеют расходы на входном и выходном постах на главной реке Дунай в момент времени а наименьшее влияние имеют расходы притока (р. Драва).

Между тем, при такой постановке задачи это ожидаемый результат, и поэтому в работе частичные коэффициенты корреляции не особенно подчеркнуты.

2. Сущность метода, разработанного профессором Г.А.Алексеевым для анализа нелинейной регрессионной модели, заключается в нормализации и выравнивании всех переменных (зависимых и независимых) и в определении коэффициентов корреляции нормированных переменных. На основании этих коэффициентов формируется корреляционная матрица, которая представляет собой основу для нелинейного регрессионного анализа. Подробное объяснение вы можете найти в известной работе самого автора метода Г.А.Алексеева.

Тисс:

Вопрос господину Оцоколичу: Применяемые верхние и нижние огибающие вдоль прямой регрессии являются простыми огибающими или доверительными полосами? Если это доверительные полосы, то на каком уровне значимости они находятся? Если это не доверительные полосы, то зачем они не применялись?

Оцоколич:

Это не простые огибающие и не доверительные полосы. На рисунках 4 и 5 представлены линии автокорреляции средних расходов первой декады месяца ( $Q_I$ ) и средних месячных расходов того же месяца, на основании данных измерения для периода 1926-1965 гг.

Мерные точки образуют в общем три, реже четыре линии. Как они используются показано в моей работе разными способами.

Паршин:

Я хочу выразить глубокую благодарность господину Подани за содержательный доклад с цифрами об экономической эффективности гидрологических прогнозов в Румынии. Это очень важная тема, которая должна получить развитие на дальнейших конференциях. Я могу добавить, что в СССР уделяется большое внимание исследованиям экономической эффективности прогнозов. Я могу сказать, что использование прогнозов в гидроэнергетике дает экономию в выработке энергии около 10% - это огромный эффект. Больше того, экономическую эффективность гидропрогнозов не всегда можно оценить, ибо неизвестно, какой ущерб последовал бы, если не было бы прогноза резкого маловодья или наводнений.

Подани:

Подчеркиваю необходимость количественно выразить экономическую эффективность прогнозов (гидрологических и гидрометеорологических) для того, чтобы расширить сеть информационно-предупредительной службы.

Экономический эффект был задуман мною только с точки зрения защиты против наводнения и негативного экологического эффекта, но он имеет ряд других выражений в области интенсивной эксплуатации гидротехнических сооружений, как показал проф. Паршин в своем дополнении к моему докладу.

THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
5800 S. UNIVERSITY AVENUE  
CHICAGO, ILLINOIS 60637  
TEL: (773) 835-3100  
WWW: WWW.CHEM.UCHICAGO.EDU

THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
5800 S. UNIVERSITY AVENUE  
CHICAGO, ILLINOIS 60637  
TEL: (773) 835-3100  
WWW: WWW.CHEM.UCHICAGO.EDU

THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
DEPARTMENT OF CHEMISTRY  
5800 S. UNIVERSITY AVENUE  
CHICAGO, ILLINOIS 60637  
TEL: (773) 835-3100  
WWW: WWW.CHEM.UCHICAGO.EDU

"Langfristige Wasserstands- und Abflußvorhersagen"

"Долгосрочный прогноз уровней и расходов воды"



DIE ABFLUSSDARLEGUNGSFUNKTION DES EINZUGSGEBIETES, GEGEBEN DURCH DIE GANGLINIEN DES  
N-JÄHRLICHEN ABFLUSSES UND DER ÜBERSCHREITUNGSDAUER DES ABFLUSSES

O. Gruber

ФУНКЦИЯ РАСХОДА ВОДЫ ВОДОСБОРНОГО БАСЕЙНА, КОТОРАЯ ИЗОБРАЖАЕТ КРИВЫЕ  
РАСХОДА ВОДЫ С N-ГODOVOЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТЬЮ И ПРЕВЫШЕНИЕМ ПРОДОЛЖИТЕЛЬ-  
НОСТИ СТОКА

O. Грубер

Zusammenfassung:

Die bisher üblichen statistischen Hilfsmittel zur Beurteilung des Abflußverhaltens eines Einzugsgebietes aus den Beobachtungen einer Pegelstation sind langjährige Mittelwerte, Häufigkeits- und Dauerzahlen für ein Regeljahr bzw. für die Regelmonate, wie auch die n-Jährlichkeitsangaben für das Jahr bzw. für die einzelnen Monate.

Diese Angaben stellen ein Nebeneinander von spezifischen Aussagen über das Abflußverhalten des Einzugsgebietes dar. Des weiteren ist ihre Aussage "summarisch", d.h., es gehen kurzfristige Ereignisse im Gesamtwert unter.

Mit der vorliegenden Arbeit wird der Versuch unternommen, die Einzelaussagen zu einer übersichtlichen Gesamtaussage zusammenzufassen. Die Ganglinien des n-jährlichen Abflusses bzw. der Überschreitungsdauer des Abflusses ermöglichen die Beurteilung des Abflußgeschehens innerhalb des Regeljahres vom Beginn bis zum Ende über den gesamten Abflußbereich. Über den praktischen Nutzen dieser Darstellung wird im Referat eingehend berichtet.

Резюме:

Применяемые до сих пор статистические вспомогательные средства для определения режима стока водосборного бассейна из наблюдений водомерного поста являются многолетними значениями, цифрами повторяемости и продолжительности на расчетный год или на расчетные месяцы, а также показателями расхода воды с n-годовой обеспеченностью на весь год или на отдельные месяцы.

Эти данные представляют собой ряд специфических высказываний о режиме стока водосборного бассейна. Их высказывание является дальше "суммарным", т. е. короткосрочные произведения проглатываются общей суммой.

Настоящей работой предпринимается попытка объединения отдельных высказываний в общую наглядную цифру. Кривые изменения расхода воды с n-годовой обеспеченностью или превышения продолжительности стока дают возможность определения режима стока в течении расчетного года от начала до конца по всему району стока. О практических выгодах настоящего изложения говорится подробно в докладе.

Einleitung:

Es ist eine der wichtigsten Aufgaben der Oberflächengewässerhydrographie, das Abflußverhalten des Einzugsgebietes zu erforschen und darzustellen. Dazu werden geeignete Beobachtungseinrichtungen und Verfahren benötigt und die Möglichkeit, die Beobachtungsergebnisse so interpretieren zu können, daß ein Maximum an wasserwirtschaftlicher Aussage bezüglich des Abflußdargebotes eines Einzugsgebietes gegeben ist.

Das Einzugsgebiet darf man gewissermaßen als die Produktionsstätte des Abflusses auffassen. Folgende Faktoren sind als wesentlich für die Produktion des Abflusses in einem Einzugsgebiet zu nennen:

- Größe und Form
- Niederschlagsverhältnisse: ihre Verteilung und Intensität, Form der Niederschläge (Regen, Schnee, Eis, Tau)
- Klimafaktoren, wie vor allem Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windverhältnisse, Sonneneinstrahlung etc.
- Orographische Verhältnisse: Gefällsverhältnisse des Geländes, Ausrichtung desselben zur Himmelsrichtung,
- Bewuchs im Einzugsgebiet
- Geologische Verhältnisse und damit verbunden die Möglichkeit der Speicherung des Wassers im Untergrund
- Das Vorhandensein von oberirdischen Speichern, wie Seen und Moore (Sümpfe)
- Verhältnis der Abflußkapazität des Flußschlauches zu den Überschwemmungsgebieten.

Weiters wird der Eingriff des Menschen durch technische Maßnahmen im Einzugsgebiet - wie Meliorationen, Flußregulierungen und Kraftwerksbauten samt den damit verbundenen Änderungen der Wellenlaufzeiten und Retentionsgegebenheiten, Siedlungsbauten, Kulturänderungen der Landwirtschaft - das Abflußdargebot des Einzugsgebietes beeinflussen.

Für die Beschreibung des Abflußdargebotes eines Einzugsgebietes verwendete die Hydrographie bisher im wesentlichen folgende statistische Kennwerte:

1. Abflußmittelwerte: Monatsmittel, Jahresmittel, Mittel über eine Reihe von Jahren
2. Extremwertangaben: Minimal- und Maximalwerte des Monats, des Jahres, einer Reihe von Jahren
3. Häufigkeits- und Dauerzahlen: für einen Monat, für mehrere Monate, für ein Jahr, für eine Jahresreihe
4. Angaben über die Wiederholungswahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen: für die einzelnen Monate, für das Jahr
5. Monatsabflußfracht, Jahresabflußfracht
6. Abflußregelganglinien
7. Abflußspendenkarte.

Diese Angaben stellen ein Nebeneinander von spezifischen Aussagen über das Abflußverhalten des Einzugsgebietes dar. Ihre Aussage ist "summarisch", das heißt, es gehen regelmäßige kurzfristige Ereignisse im Gesamtwert unter. Es gelingt daher jeweils nur teilweise, das Abflußverhalten des Einzugsgebietes zu beschreiben. Vor allem ist es notwendig, das Nebeneinander von Einzelaussagen für eine Gesamtbeurteilung zusammenzufassen. Dennoch gelingt es nicht, die Gesetzmäßigkeit des Abflusses eines Einzugsgebietes so zu interpretieren, daß das Abflußverhalten bis in die letzten Details zu erkennen ist.

Bezüglich der Aussage über ein Einzugsgebiet ist wesentlich zu unterscheiden zwischen Angaben über mehr oder weniger kurze Zeitabschnitte - bis maximal 1 Jahr - und solchen, die ein ganzes Jahr bzw. viele Jahre betreffen. Zu den letzteren gehören z.B. Jahresmittel, Mittel über viele Jahre, Dauerzahlen für 1 Jahr bzw. viele Jahre, weiters die Angabe der wahrscheinlichen Wiederkehr für das ganze Jahr etc.

Die vorliegende Ausarbeitung behandelt ausschließlich das Regeljahr. Die Meteorologie verwendet für eine derartige Darstellung den Begriff "kalendermäßige Bindung" der Witterung (Schmauß, Lauscher, Steinhauser). Im gegenständlichen Fall wird der Versuch unternommen, den Abfluß aus einem Einzugsgebiet in Abhängigkeit von der Zeit - also seiner kalendermäßigen Bindung - und von der Wahrscheinlichkeit des Eintreffens darzustellen. Es läßt sich zeigen, daß bei einer entsprechend langen Reihe eine Gesetzmäßigkeit in der Form

$$Q = f(\text{Zeit, Wahrscheinlichkeit})$$

vorliegt. Diese Funktion wird "Abflußdargebotsfunktion" des Einzugsgebietes genannt.

Das ständig anfallende hydrographische Beobachtungsmaterial muß geordnet und geprüft werden, um sodann in regelmäßig erscheinenden Druckwerken, wie dem Hydrographischen Jahrbuch, der Wasserwirtschaft zur Verfügung zu stehen. Es wäre allerdings erforderlich, zu den Beobachtungswerten hinzuzusetzen, in welchem Maße sie noch den Anforderungen einer aktuellen Wasserwirtschaft entsprechen, das heißt, wie lange ein Wert für die Verwendung für wasserwirtschaftliche Planungen geeignet und ab wann dieser Wert nur mehr historisch von Interesse ist z.B. als Grundlage für eine Trenduntersuchung der Veränderung des Einzugsgebietes. Die hierfür erforderlichen Kriterien sind sehr vielfältig und es bietet sich die Abflußdargebotsfunktion des Einzugsgebietes für die Gesamtbeurteilung aller den Abfluß bestimmenden Faktoren an.

#### Ermittlung der Abflußdargebotsfunktion eines Einzugsgebietes.

Die Abflußdargebotsfunktion eines Einzugsgebietes ist im Idealfall sowohl durch die Ganglinien der täglichen Überschreitungsdauer des Abflusses wie auch durch die Ganglinien des jeweils auf einen Tag bezogenen n-jährlichen Abflusses gegeben. Je nach der Länge der für die Erstellung der Abflußdargebotsfunktion gege-

benen Zeitreihe von Beobachtungswerten muß man bei der Wahl des Zeitintervalls für die Ermittlung der Überschreitungsdauer bzw. der n-Jährlichkeit vom Idealfall "1 Tag" abrücken und ein längeres Zeitintervall bis zu maximal 1 Monat verwenden. Als sinnvolle Länge der Zeitachse der Funktion wird das jeweils gewählte Abflußjahr herangezogen. Die Wahrscheinlichkeit wird zweckmäßigerweise in Prozenten der Überschreitungsdauer bzw. als n-Jährlichkeit von HW-Ereigniswellen angegeben.

Für alle Zeitintervalle des Abflußjahres wird eine Überschreitungsdauerermittlung durchgeführt und das Ergebnis auf Prozente der Überschreitungsdauer umgerechnet. Das Ergebnis wird nun in der Mitte des jeweiligen Zeitintervalles aufgetragen. Die gleichwertigen Werte in den einzelnen Zeitintervallen werden nun zu einer Ganglinie verbunden.

Liegt z.B. eine Abflußkollektiv von 100 Jahren der Ausarbeitung zugrunde, dann wäre diese Jahresreihe lange genug, um als Zeitintervall "einen Tag" zu verwenden. Man würde nun für jeden einzelnen Kalendertag die vorliegenden 100 Abflußwerte einer Häufigkeitsauszählung unterwerfen und daraus durch Summenbildung der Häufigkeiten die sogenannte "Dauerlinie" ermitteln. Ganz allgemein stellt die Summenlinie eine Art Verteilungsgesetz eines bestimmten Merkmales dar. Im gegenständlichen Fall wird also für jeden einzelnen Kalendertag das Verteilungsgesetz der vorliegenden 100 Abflußdaten (z.B. Tagesmittelwerte) und durch die ganglinienmäßige Verbindung der gleichwertigen Werte der einzelnen Tage die Verteilungsfunktion des Abflusses für das Abflußjahr ermittelt.

Die Abflußdargebotsfunktion, dargestellt als Ganglinie der täglichen Überschreitungsdauer des Abflusses, ist, vom Standpunkt der allgemeinen Statistik aus betrachtet, das Verteilungsgesetz des Merkmals "Abfluß" über den Bereich des Abflußjahres.

Bei der Ermittlung der Ganglinien der n-Jährlichkeit von HW-Ereignissen verfährt man in analoger Weise. Die zu wählende Methode für die Ermittlung der n-Jährlichkeit von HW-Ereignissen für das gewählte Zeitintervall bleibt dem jeweiligen Bearbeiter überlassen und hängt weitestgehend von den Umständen ab. Die für die einzelnen Zeitintervalle ermittelten n-Jährlichkeiten sind wieder in der Mitte des Zeitintervalles aufzutragen und die gleichwertigen Werte zu verbinden.

Mit der Größe der Intervallbreite des Zeitabschnittes eng verbunden ist das Auflösungsvermögen der Abflußdargebotsfunktion. Je kleiner die Abschnitte gewählt werden, um so selektiver und sicherer ist die Aussage. Vor allem im Bereich der kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten nimmt die Selektion mit der größeren Intervallbreite rasch ab.

#### Die Abflußdargebotsfunktion der österreichischen Donau und der March nahe der Mündung in die Donau.

Für folgend angeführte Profile im Bereich der österreichischen Donau sowie der March wurde die Abflußdargebotsfunktion in Form von

- a) Ganglinien der Überschreitungsdauer des Abflusses für den Pegel Linz/Donau, 1941 - 1970, (Einzugsgebiet: 79.490 km<sup>2</sup>)
- b) Ganglinien der Überschreitungsdauer des Abflusses für Wien/Donau, 1921 - 1970, (Einzugsgebiet: 101.731 km<sup>2</sup>)
- c) Ganglinien der Überschreitungsdauer des Abflusses für das Zwischeneinzugsgebiet vom Pegel Linz bis Wien (Einzugsgebiet: 22.241 km<sup>2</sup>)
- d) Ganglinien der Überschreitungsdauer des Abflusses und der n-Jährlichkeit für den Pegel Angern/March. (Einzugsgebiet: 25.624 km<sup>2</sup>)

ermittelt.

Zu a) Die Abflußdargebotsfunktion für das Einzugsgebiet der Donau bis zum Pegel Linz/Donau (Strom-km 2 135,17 rechtes Ufer, Einzugsgebiet: 79.490 km<sup>2</sup>) wurde durch die Ganglinien für die Überschreitungsdauer des Abflusses, ermittelt aus den Abflußtagesmittelwerten der Reihe 1941 - 1970, dargestellt (Abb.1).

Als Zeitintervall für die Ermittlung der Überschreitungsdauer des Abflusses wurde jeweils für jeden Kalendermonat der Abschnitt 1. bis 10., 11. bis 20. und 21. bis Monatsletzter gewählt.

Die Ganglinie der 100 %-Überschreitungsdauer bilden die für jeden Kalendertag des Regeljahres ermittelten Abflußminimalwerte der verwendeten Jahresreihe. Die mit starkem Strich eingetragene Ganglinie der (100 %-Überschreitungsdauer stellte die nach dem Gefühl gezogene nach unten begrenzende Einhüllende der exakt ermittelten 100 %-Überschreitungsabflußganglinie dar.

Zu b) Die Abflußdargebotsfunktion für das Einzugsgebiet der Donau bis zum Pegel Wien-Reichsbrücke (Strom-km 1 929,09 rechtes Ufer, Einzugsgebiet: 101.731 km<sup>2</sup>) - Durchfluß am Pegel Wien-Reichsbrücke + Durchfluß Donaukanal - wurde durch die Ganglinien für die Überschreitungsdauer des Abflusses, ermittelt aus den Abflußtagesmitteln aus der Reihe 1921 - 1970, dargestellt (Abb. 2).

Die Art der Ermittlung erfolgte in der gleichen Weise wie die der Abflußdargebotsfunktion für das Einzugsgebiet der Donau bis Linz.

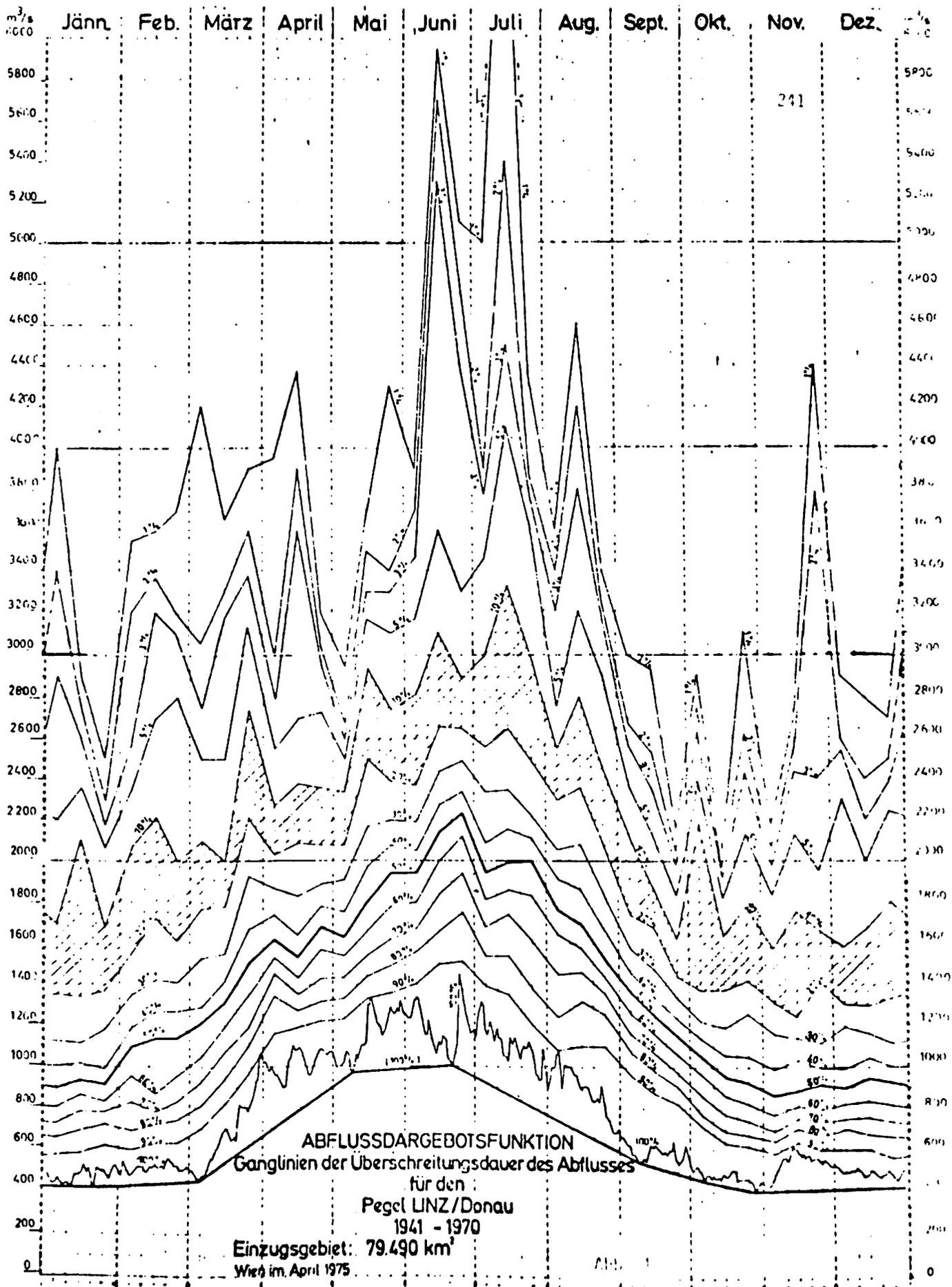
Die Abflußdargebotsfunktion für Linz und Wien zeigen das Abflußbild eines alpinen Stromes, dessen Einzugsgebiet Höhen zwischen fast 4 000 m ü.A. bis etwa 150 m ü.A. aufweist. Die Niederschläge in diesem Einzugsgebiet liegen zwischen über 2 500 mm und etwa 500 mm pro Jahr.

Die Ganglinien der Überschreitungsdauer des Abflusses für Linz und Wien zeigen im Bereich von 100 % bis 20 % den Jahresregelabfluß, wie er auch annähernd aus den bisherigen statistischen Ausarbeitungen zu entnehmen ist. Die Überschreitungsdauer von 10 % bis 1 % würde nach einer großzügigen Ausrundung ein ebensolches Bild ergeben. Während die Ganglinien der Überschreitungsdauer des Abflusses für den Bereich 100 % bis 20 % Überschreitungsdauer klar erkennen lassen, daß es sich hier um eine Abflußdargebotsfunktion handelt, ist dies für den Bereich 10 % bis 1 % fürs erste nicht plausibel.

Die Schraffierung der Fläche zwischen der 20 %- und der 10 %-Überschreitungsdauer-Ganglinie soll deutlich das Regelverhalten des Abflusses (80 % aller Werte) von den seltenen Ereignissen trennen.

Es wäre nun die Frage zu prüfen, ob im Bereich der kleinen Wahrscheinlichkeiten der Verlauf der Ganglinien nur ein Zufall ist und durch eine Ausrundung derselben deren Verbesserung zu erreichen wäre oder ob er durch Gesetzmäßigkeiten des Witterungsablaufes begründet ist.

Die Meteorologie steht, da sie die wesentlichen Faktoren des Abflusses liefert, vor den gleichen Problemen. Durch Zusammenfügen der langjährigen Mittel der einzelnen meteorologischen Komponenten kommt es zur Bildung eines kollektiven Wetters. Es kommt gewissermaßen jedem Tag des Jahres ein bestimmtes Wetter zu und zwar nicht in einem einzelnen Jahr sondern in Zusammenfassung vieler Jahre. Die Zacken und Spitzen dieser meteorologischen Jahreskurve wurden früher als "Zufälligkeiten" angesehen. Im weiteren konnte gezeigt werden, daß diese "Singularitäten" den Anspruch auf höhere Bewertung erheben können. Je tiefer man in die Struktur des jährlichen Witterungsablaufes eindringt, desto mehr erfährt man über seine kalendermäßige Bindung, welche in den "Singularitäten" - man könnte statt dessen auch "wiederkehrende Wetterwendepunkte" sagen - zum Ausdruck kommen. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, daß in den Singularitäten eine "Tendenz" zu bestimmten Wettervorgängen an bestimmten Tagen des Jahres erblickt werden darf, daß aber die Ausführung mit so veränderlicher Amplitude erfolgt, daß die prognostische Bedeutung der Wetterwendepunkte keinesfalls überschätzt werden darf. Es bleibt anzumerken, daß in unseren Volkswetterregeln, die viel Wahres aber auch viel Fragwürdiges enthalten, ebenfalls der Gedanke einer kalendermäßigen Bindung des Wetters seinen Niederschlag gefunden hat. Es ist das um so erstaunlicher, als alle derartigen Regeln nur für das Kollektiv gelten, dem



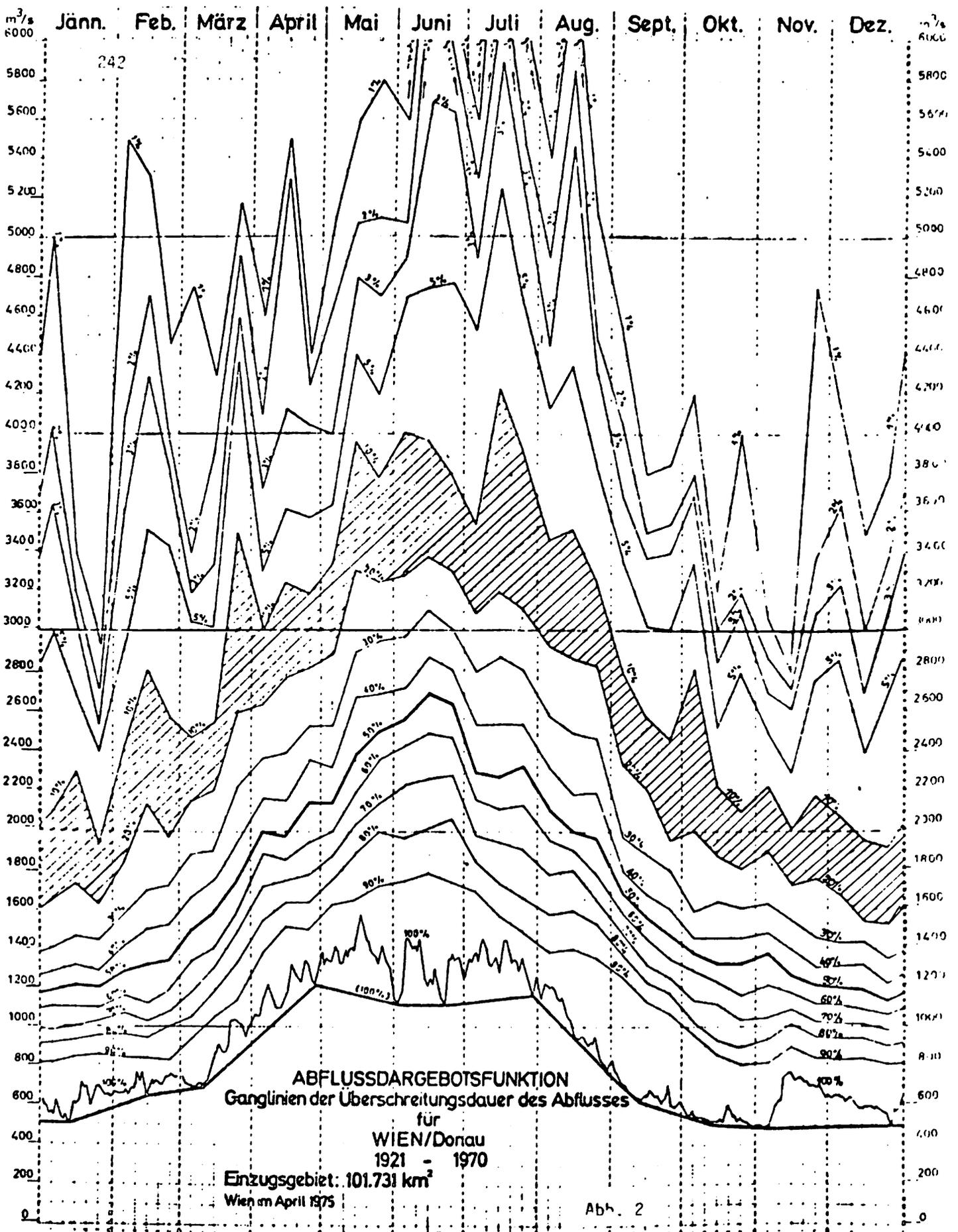


Abb. 2

Einzelfall aber oft nur andeutungsweise Rechnung tragen. Wie wir die spezifische Beobachtungsgabe vor allem unserer Landbevölkerung für Wettervorgänge bestaunen, müssen wir auch bewundern, daß sie das Skelett des jährlichen Witterungsablaufes gedächtnismäßig festgehalten hat.

Über viele Jahre gesehen liegt das Gerippe des jährlichen Witterungsablaufes kalendermäßig ziemlich fest, aber das Ausmaß, das eine Senke oder ein Gipfel annimmt, ist für das einzelne Jahr individuell. Bezüglich der Singularitäten ist zu sagen, daß diese an sich nicht ein Zufallsergebnis sind, sondern die Stoßkraft, die ihnen aufgrund der augenblicklichen synoptischen Gegebenheit zukommt.

Anhand einiger Beispiele soll gezeigt werden, in welchem Maße sich in der Abflußdargebotsfunktion der Wetterablauf widerspiegelt: Die Bauernregel "Matthäus bricht's Eis; find't er kein's, so macht er ein's" beruht auf der vom Volk jahrelang beobachteten Tatsache, daß man zu Beginn eines Winters zwar nicht vorhersagen kann, wie die Witterung um die Zeit des 24. Februar sein wird, wohl aber, daß um diese Zeit mit einem Wetterwendepunkt zu rechnen ist. Unsere alljährliche Erfahrung bestätigt diese Aussage: nach einem Ausbleiben der Kälte vor dem Februar pflegt diese sich mit großer Regelmäßigkeit zu einem unerwünschten späteren Zeitpunkt einzustellen.

In der Abflußdargebotsfunktion kommt das Eis zu "Matthäus" (24. Februar) durch einen kleinen Abfluß zum Ausdruck. "Find't er kein's, so macht er ein's" wird in der Abflußdargebotsfunktion durch das Abflußloch anfangs März bestätigt, sofern ein hoher Abfluß dieser Zeit vorangegangen ist.

- Der Kälterückfall in der ersten Hälfte des Monats Mai - bekannt als "Eismänner" - ist ebenfalls aus der Abflußdargebotsfunktion durch die Abflußzunahme Mitte Mai deutlich zu erkennen.

- Die markanten Junikälterückfälle mit ihren großen Niederschlägen treten in der Abflußdargebotsfunktion durch entsprechende Abflüsse stark in Erscheinung.

- Der als Wetterschicksalstag bekannte "Maria Himmelfahrtstag" (15. August) läßt sich aus der Abflußdargebotsfunktion für jene Wetterwende, die Niederschläge bringt, sehr deutlich erkennen. Jene Wende, die zu einem schönen Wetter - verbunden mit geringen Abflüssen - führt, verlagert sich abflußmäßig in den Bereich des mittleren Abflußverhaltens.

- Trotz der Seltenheit von Hochwässern in den Monaten Oktober und November haben diese einen besonderen, allgemein im Volksmund verbreiteten Namen: sie heißen "Laubagieß", weil sie zur Zeit des Laubfalles eintreten. In der Abflußdargebotsfunktion kommen sie ebenfalls markant zum Ausdruck.

Auch anhand des Jahresganges der Bewölkung sowie der Niederschlagsbereitschaft bzw. der täglichen Niederschlagsmenge (Steinhauser) - dargestellt als Mittelwerte aus jahrzehntelangen Reihen - läßt sich erkennen, daß die kalendermäßige Bindung von Witterungsfaktoren nicht einfach als Zufallserscheinung abgetan werden kann.

Es liegt in der Natur der Sache, daß die Abflußdargebotsfunktion nur jene seltenen meteorologischen Einflüsse auf den Abfluß registrieren kann, die im Bereich höherer Abflüsse liegen. Der Vergleich der Ganglinien der Überschreitungsdauer von 10 % bis 1 % mit den Ergebnissen der Singularitätenforschung läßt den Schluß zu, daß diese ihre Form nicht dem Zufall, sondern einer gesetzmäßigen Verursachung verdanken. Aufgrund dieser Erkenntnis sind sie für die Anwendung in der Wasserwirtschaft ungleich wertvoller.

In Analogie zur Meteorologie, die feststellt: "Nicht die Singularitäten an sich sind ein Zufallsergebnis, sondern die Stoßkraft, die ihnen aufgrund der augenblicklichen synoptischen Gegebenheiten zukommt", wäre für die Abflußdargebotsfunktion zu sagen: "Nicht die Abflußdargebotsfunktion der kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeit an sich ist ein Zufall, sondern der Zeitpunkt, wann diese Gesetzmäßigkeiten zum Tragen kommen."

Zu c) Ganglinie der Überschreitungsdauer des Abflusses für das Zwischeneinzugsgebiet vom Pegel Linz bis Wien (Einzugsbiet: 22.241 km<sup>2</sup>). Es läßt sich in einem Einzugsgebiet für jedes beliebige Profil des Gewässernetzes, ebenso wie für das Zwischeneinzugsgebiet zwischen 2 Profilen an einem Gewässer, eine Abflußdargebotsfunktion ermitteln. In der Natur entsteht die Abflußdargebotsfunktion des flußabwärtigen Profils ( $Q_u$ ) durch Überlagerung der Abflußdargebotsfunktion des Oberliegerprofils ( $Q_o$ ) mit jener des Zwischeneinzugsgebietes ( $Q_{zw}$ ). Es ergibt sich

$$Q_o = f(t,w) \quad Q_{zw} = f(t,w)$$

$$Q_u = Q_o + Q_{zw} = f(t,w)_o + f(t,w)_{zw}$$

Im vorliegenden Fall wurde die Abflußdargebotsfunktion der Donau für das Profil Linz und Wien bereits erstellt. Es besteht nun die Möglichkeit durch Differenzbildung in der Form

$$Q_{zw} = f(t,w)_{Wien} - f(t,w)_{Linz}$$

die Funktion des Zwischeneinzugsgebietes zu ermitteln.

Im Zwischeneinzugsgebiet vom Pegel Linz bis Wien befinden sich am rechten Ufer als wesentlicher Zubringer die Traun, Enns, Ybbs, Erlauf, Melk, Traisen und Tulln bzw. am linken Ufer die Naarn, die Isper, der Weitenbach und der Kamp.

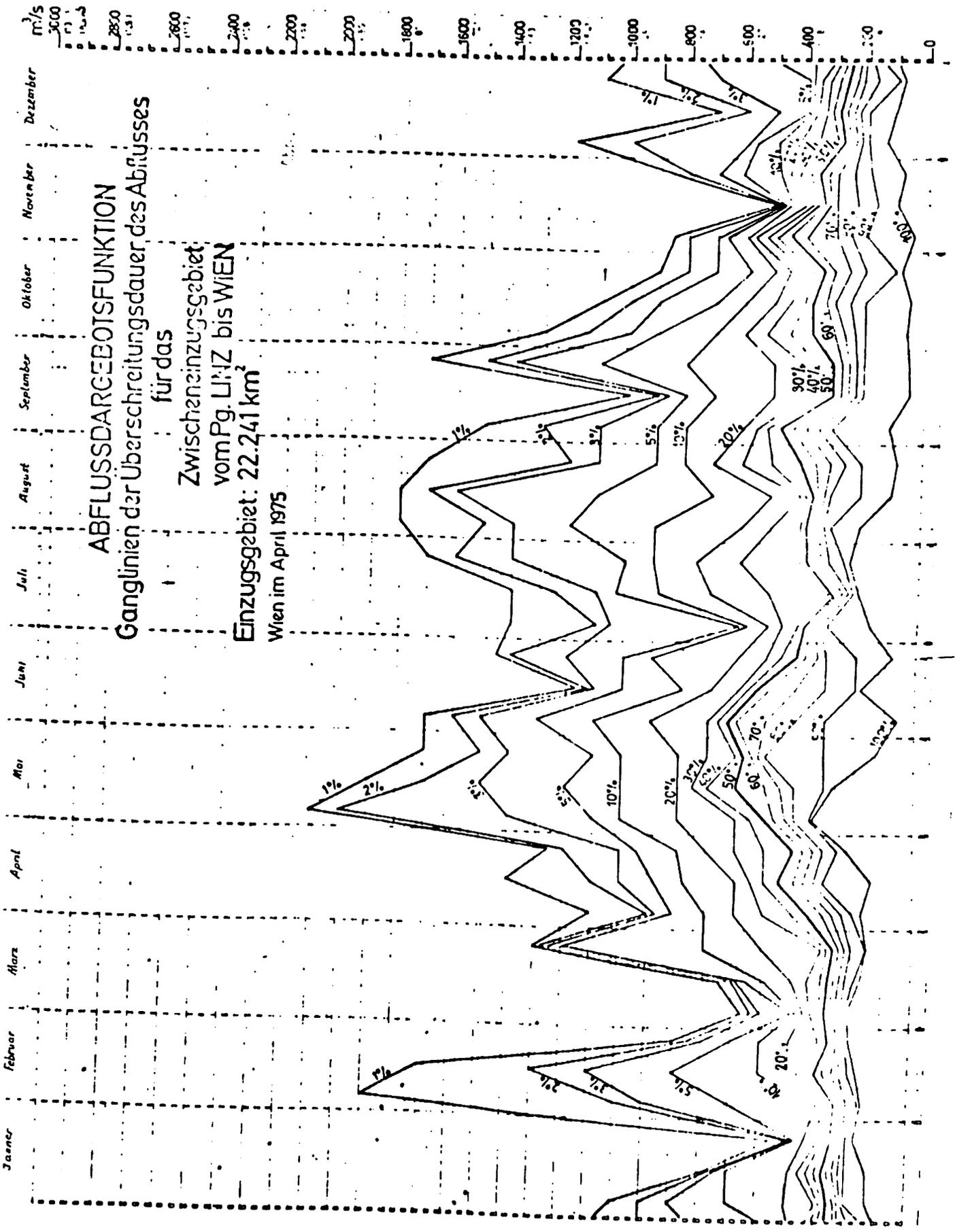
Die Addition des Abflusses des der Mündung nächstgelegenen Pegel sämtlicher Zubringer im Zwischeneinzugsgebiet wäre sehr aufwendig und würde nicht das gesamte Einzugsgebiet erfassen. Man wäre für das Resteinzugsgebiet auf Schätzungen angewiesen. Es ist daher zweckmäßig, den Abfluß aus dem Zwischeneinzugsgebiet durch Differenzbildung des Abflusses zwischen Wien und Linz zu ermitteln, wobei man die auftretenden Fehler, die durch die Wellenlaufzeit und die Retentionsgegebenheiten der Donau entstehen, hinnimmt. Diese Methode ist nur möglich, wenn das Abflußkollektiv für beide Profile aus den gleichen Kalenderjahren stammt. Im gegenständlichen Fall wurde für die Abflußdargebotsfunktion für das Profil Linz die Reihe 1941 - 1970 und für das Profil Wien die Reihe 1921 - 1970 verwendet. Um auf die längere Reihe nicht verzichten zu müssen, wurde mittels einer statistischen Methode die Abflußdifferenz der beiden Kollektive ermittelt (Abb. 3).

Die Vorgangsweise bei der Erstellung der Ganglinie der Überschreitungsdauer des Abflusses ist gleich jener für die vorgenannten Profile Linz und Wien.

Das Zwischeneinzugsgebiet von Linz bis Wien ist fast so groß wie jenes der March im Profil Pegel Angern (Abb. 4). Der Vergleich der Abflußdargebotsfunktion zeigt sehr anschaulich, daß die Größe des Einzugsgebietes absolut kein Maß für den Abfluß ist. Das Zwischeneinzugsgebiet ist teilweise alpin und zum überwiegenden Teil voralpin, während das Marcheinzugsgebiet keine nennenswerten Erhebungen über 600 m U.A. aufzuweisen hat. Ebenso gravierend ist der Unterschied der Niederschlagsverhältnisse.

Beim Vergleich der Abflußdargebotsfunktion für das Zwischeneinzugsgebiet mit jener für das Profil Linz, die einem etwa 4 mal so großen Einzugsgebiet zugeordnet ist, zeigen sich beim mittleren Abfluß ähnlich große Abflußspendenwerte, während für den Bereich der Überschreitungsdauer von 5 % bis 1 % das Zwischeneinzugsgebiet höhere Abflußspenden aufweist. Bemerkenswert ist auch das zeitliche Auftreten der singulären Erscheinungen, die im Zwischeneinzugsgebiet teilweise wesentlich anders liegen als in Linz. Hervorzuheben ist weiters das "Abflußloch" von Mitte Juni bis Mitte Juli. Es scheint, daß der geringe Abflußanteil des Einzugsgebietes stromab von Linz bis Wien am Gesamtabfluß des Julihochwassers 1954 kein Zufall war, sondern gesetzmäßig begründet ist.

Zu d) Die Abflußdargebotsfunktion für das Einzugsgebiet der March am Pegel Angern/March (Fluß km 31,89 rechtes Ufer, Einzugsgebiet: 25.624 km<sup>2</sup>) wurde sowohl mittels der Ganglinien für die Überschreitungsdauer



# ABFLUSSDARBEITSFUNKTION

Ganglinien der Überschreitungsdauer des Abflusses für das

Zwischeneinzugsgebiet

vom Pg. LITZ bis WIEN

Einzugsgebiet: 22.241 km<sup>2</sup>

Wien im April 1975

+ HQ-EINZELWERTE : 1893-1930 PG HOHENAU  
1930-1971 PG ANGERN

### ABFLUSSDARLEGEBOTSFUNKTION Pegel ANGERN/March

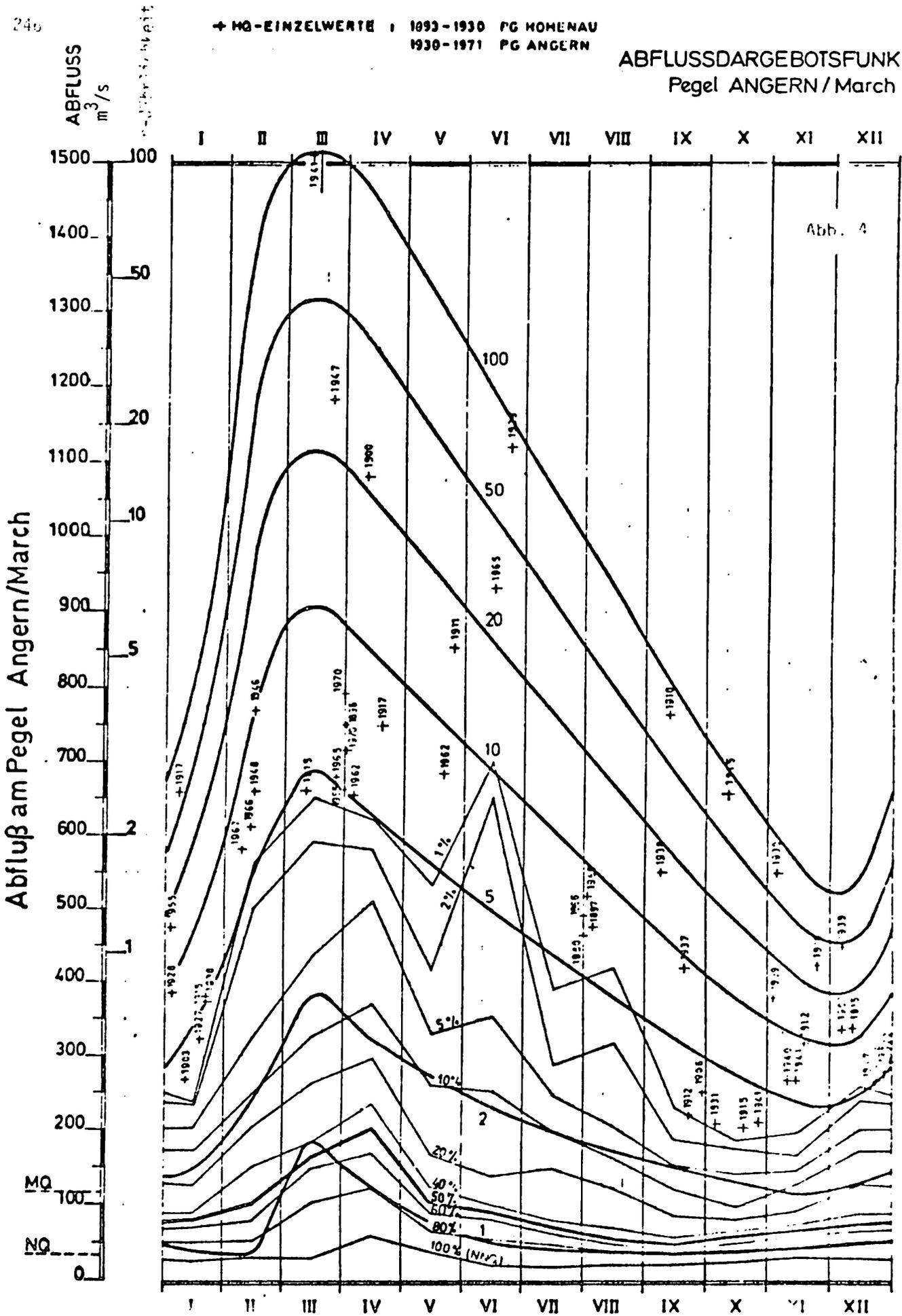


Abb. 4

des Abflusses wie auch mittel der Ganglinien des n-jährlichen Abflusses dargestellt (Abb. 4).

Als Zeitintervall für die Ermittlung der Überschreitungsdauer des Abflusses wurde infolge der verwendeten kurzen Reihe von 15 Jahren (1957 - 1972) der Kalendermonat gewählt.

Die Ganglinien des n-jährlichen Abflusses wurden derart ermittelt, daß nach Eintragung der Hochwasserabflußscheitelwerte der Jahresreihe 1893 - 1972 in die Gangliniendarstellung eine einhüllende Kurve für die n-Jährlichkeit = 80 nach dem Gefühl gezogen wurde. Als einjährliches Hochwasser wurde für jeden Kalendermonat der niedrigste Monatsmaximalwert der Jahresreihe 1957 - 1972 einfachheitshalber festgelegt. Die dazwischenliegenden Werte wurden durch lineare Interpolation auf einem doppellogarithmischen Raster ermittelt. Wie die Darstellung zeigt, ist das Ergebnis plausibel und in der Aussage bemerkenswert.

Im gegenständlichen Fall liegt ein Einzugsgebiet vor, das bezüglich der Wasserführung im wesentlichen von der Schneeschmelze und vom Grundwasserabfluß beherrscht wird. Sommerniederschläge führen nur selten zu größerer Wasserführung. Der Herbst ist im wesentlichen auf den Grundwasserabfluß - verbunden mit geringen Niederschlägen - beschränkt. Daher führen in dieser Jahreszeit HW-Ereignisse mit großer n-Jährlichkeit lediglich zu Abflüssen, die in den Monaten Februar bis Juni eine Überschreitungshäufigkeit von 1 % bis 5 % aufweisen.

Die Abflußdargebotsfunktion zeigt im wesentlichen eine stetige Gesetzmäßigkeit. Die 1 % bis etwa 5 % Überschreitungshäufigkeit im Juni und August weicht davon markant ab. Allerdings muß man bei einer kurzen Reihe bezüglich des Erkennes einer Abweichung von der allgemeinen Funktion sehr kritisch sein. Im gegenständlichen Fall wird aber die Abweichung der 1 % bis 2 % Häufigkeitsganglinie im Juni auch durch die HW-Scheitelereignisse untermauert, das heißt, es ist auch bei den HW-Ereignissen eine deutliche Senke im Zeitabschnitt Ende April bis Mai zu erkennen. Immerhin ermöglicht bereits diese kurze Reihe - vor allem im Zusammenhang mit der Auswertung der HW-Scheitelereignisse - einen Einblick in das Abflußgeschehen, wie er bisher nicht der Fall war. Als besonders bemerkenswert darf die gute Übereinstimmung der Form der Ganglinie der Überschreitungsdauer des Abflusses und der n-Jährlichkeit der HW-Ereignisse hervorgehoben werden.

#### Praktische Anwendung

Die Abflußdargebotsfunktion eines Einzugsgebietes in Form der Ganglinien des n-jährlichen Abflusses bzw. der Überschreitungsdauer des Abflusses ermöglicht die sichere Beurteilung des Abflußgeschehens innerhalb des Regeljahres vom Beginn bis zum Ende über den gesamten Abflußbereich mit Ausnahme großer Hochwässer.

Bei der praktischen Anwendung muß der Grundsatz gelten, daß die Abflußwahrscheinlichkeit zur Prognose für einen bestimmten Einzelfall nur mit Vorsicht zu verwenden ist. Wesentlich verlässlicher verwerten lassen sich mit Berechtigung diese Wahrscheinlichkeiten, wenn sie zur Beurteilung einer größeren Zahl von Fällen, also z.B. für denselben Tag in einer längeren Aufeinanderfolge von Jahren, verwendet werden. Im Einzelfall nennen sie uns nur die Chancen, die wir in dem Glücksspiel haben, das die Spekulation auf bestimmte Abflußverhältnisse eines Tages, für längere Zeit voraus, immer bleibt.

Für die Lösung der folgend beispielsweise angeführten Probleme der Wasserwirtschaft ist die Abflußdargebotsfunktion eine wertvolle Grundlage:

- Standortbestimmung der jeweiligen Abflußsituation
- Großschiffahrt betreffend Fahrwasserverhältnisse und Durchfahrtsverhältnisse unter Brücken
- Wasserentnahme für verschiedene Zwecke aus dem Gewässer
- Wasserkraftwirtschaft betreffend die Revision der Turbinen und Wehrverschlüsse
- kurzfristige Bauführung im Gewässer, wie etwa das Einziehen eines Dükerrohres
- kurzfristige Bauführung am Ufer bzw. im Überflutungsgebiet des Gewässers und damit zusammenhängenden Problemen des ufernahen Grundwasserstandes bzw. Höhe der Baugrubenumschließung

- Durchführung von Regulierungsbauten im Gewässer
- Probleme des abflußabhängigen Geschiebetransportes im Zusammenhang mit der Baustoffgewinnung aus dem Gewässer
- Probleme der Gewässerbelastung im allgemeinen und der Wärmebelastung im besonderen
- Probleme der ufernahen Grundwasserverhältnisse im Zusammenhang mit der Vegetation im Bereich der Aulandschaften.

Im folgenden soll anhand einiger der oben genannten Beispiele die praktische Anwendung erläutert werden.

### 1. Beispiel:

**Aufgabenstellung:** Es soll ein Schwerguttransport, z.B. ein großer Bauteil für ein Kraftwerk, auf dem Wasserweg durchgeführt werden. Der Bauteil wäre zuerst auf dem Seeweg und dann ohne umzuladen auf dem Binnenweg Donau bis zum Bestimmungsort zu transportieren. Entsprechend der Konstruktion eines Seeschiffes sind sowohl der Tiefgang wie auch die Aufbauten größer als bei einem auf die Verhältnisse des Binnengewässers ausgelegten Schiff. Der Transport auf der Donau ist daher nur in einem ganz bestimmten Abflußintervall, bei dem sowohl der Tiefgang wie auch die Durchfahrtshöhe gegeben ist, möglich. Im vorliegenden Beispiel wäre der Tiefgang 3,0 m und die Höhe der Aufbauten über dem Wasserspiegel 9,80 m. Dem Tiefgang würde in der österreichischen Donaustrecke von der Marchmündung bis Krems eine Mindestwasserführung von  $Q = 1\,660\text{ m}^3/\text{s}$  und für die erforderliche Durchfahrtshöhe eine maximale Wasserführung von  $Q = 3\,400\text{ m}^3/\text{s}$  entsprechen. Im weiteren wird für den Transport eine Durchführungswahrscheinlichkeit von 80 % gefordert. Die Darstellung (Abb. 5) zeigt sehr anschaulich, in welchen Zeitabschnitten des Regeljahres der Transport zu den oben gegebenen Bedingungen möglich ist. Die erforderliche Fahrwassertiefe ist lediglich in der Zeit vom 27. April bis zum 25. Juli mit der erforderlichen Wahrscheinlichkeit gegeben. Die erforderliche Durchfahrtshöhe unter den Donaubrücken ist bei der geforderten Wahrscheinlichkeit der Transportdurchführung das ganze Jahr gewährleistet. Man wird zweckmäßigerweise den Transport in der Zeit vom 27.4. bis 25.7. durchführen.

### 2. Beispiel:

**Aufgabenstellung:** Bei einem Donaukraftwerk wurden 6 Kaplan turbinen mit je einer maximalen Schluckfähigkeit von  $400\text{ m}^3/\text{s}$  installiert. Die jährlich durchzuführende Turbinenrevision dauert pro Turbine 1 Monat. Es dürfen nie mehr als 2 Turbinen gleichzeitig in Revision sein. Es wären jene Zeitabschnitte für die jährlich durchzuführende Revision auszuwählen, bei denen ein Minimum an Ausfall von Stromerzeugung gegeben ist.

Da es bis heute keine Abflußvorhersagen für 1 Monat oder noch längere Zeiträume gibt, bietet sich hier im besonderen die Abflußdargebotsfunktion zur Lösung dieser Aufgabe an (Abb. 6). Da ein Kraftwerksunternehmen seine energiewirtschaftlichen Überlegungen über die gesamte Bestandsdauer des Kraftwerkes ausrichten muß, ist die Heranziehung der Abflußdargebotsfunktion, die auf lange Zeitreihen beruht, die plausibelste Grundlage für die Lösung dieser Aufgabe. Es ergibt sich als Minimum des Energieausfalles jene Lösung, bei der

$$E_v = \sum_{\text{Turb.1}}^{\text{Turb.6}} Q \times T \times O \times K$$

$E_v$  = die für den Energieverlust repräsentative Größe ohne Beachtung der Dimension

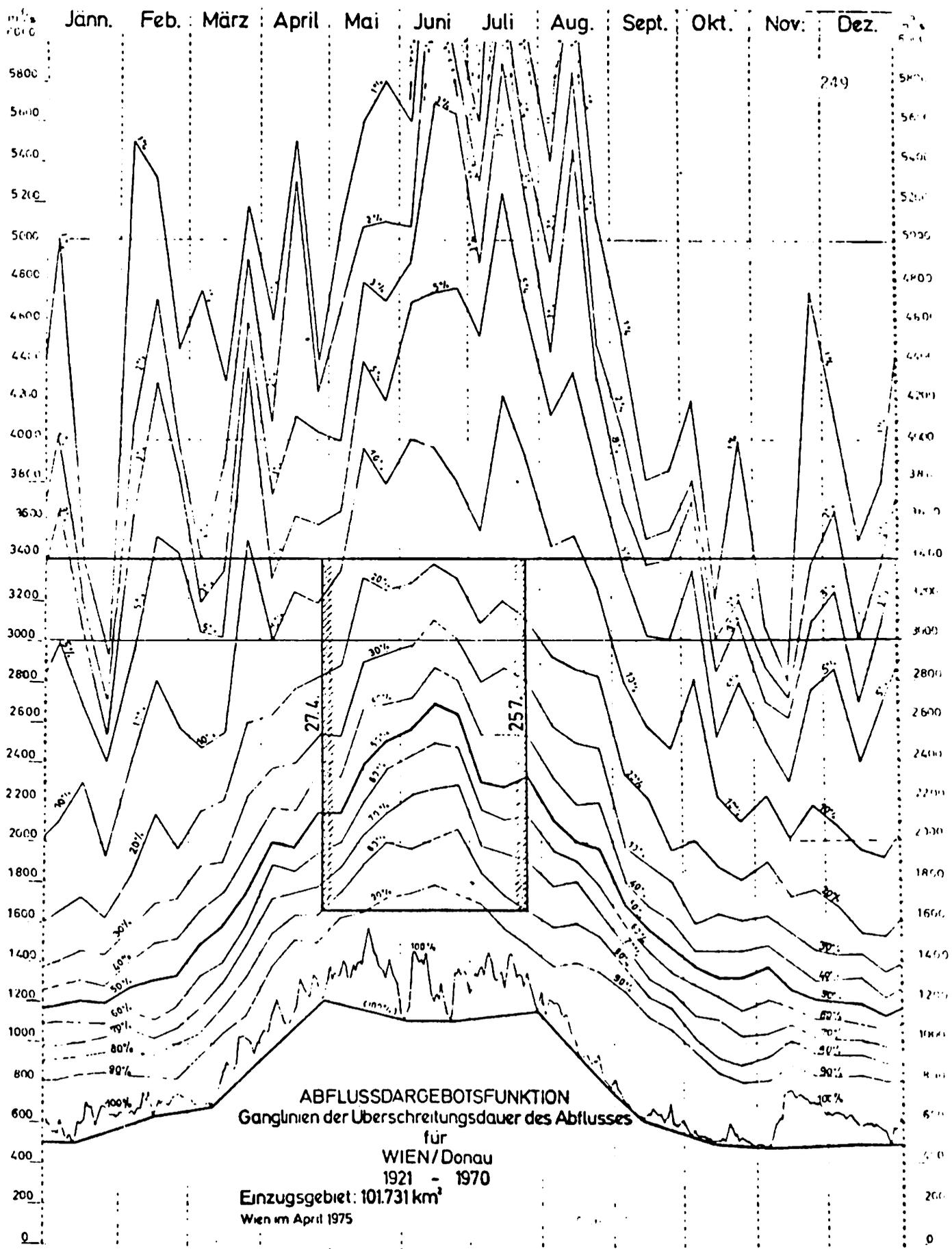
$Q$  = maximale Schluckfähigkeit der Turbinen in  $\text{m}^3/\text{s}$

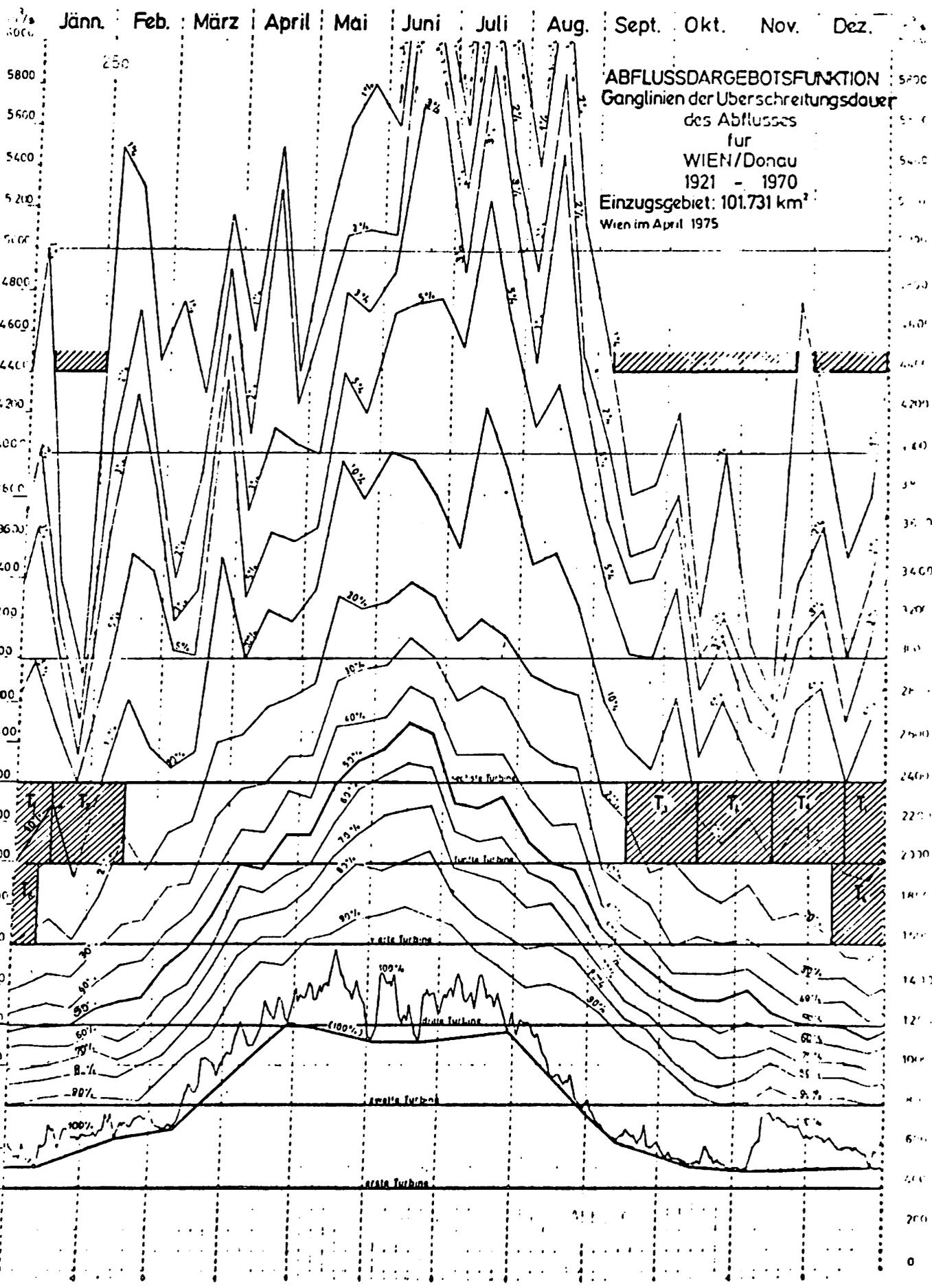
$T$  = für die Revision erforderliche Zeit in Tagen

$O$  = zugeordnetes Mittel der Überschreitungsdauer in % der von jeder Turbine überdeckten Fläche der Abflußdargebotsfunktion

$K$  = Kostenfaktor zur Berücksichtigung unterschiedlicher Kosten der Revision

ein Minimum wird.





Als weitere Aufgabenstellung ergibt sich die Frage nach dem günstigsten Zeitabschnitt für eine etwaige Revision der Wehrfelder. Die Fragestellung könnte lauten: Ein Wehrfeld sollte dann in Revision genommen werden, wenn die Wahrscheinlichkeit, daß ein Abfluß von  $4\,400\text{ m}^3/\text{s}$  gegeben ist, sehr klein ist. Wie aus der Abflußdargebotsfunktion zu entnehmen ist, ist diese Forderung in folgenden Zeitabschnitten gegeben: 10.1.-1.2., 6.9.-23.11., 1.12.-31.12.

### 3. Beispiel:

Bei der Bauführung im oder am Gewässer - seien es Regulierungsbauten, der Einzug eines Dükerrohres in das Querprofil eines Gewässers oder Bauten in der Nähe des Ufers - genügt die Kenntnis des kritischen Abflusses, um aus der Abflußdargebotsfunktion die entsprechende Wahrscheinlichkeit des Eintretens zu entnehmen. Der Zeitabschnitt mit der größten Chance für die günstigsten Wasserstände und damit für die Baudurchführung ist dann leicht zu wählen.

### Zusammenfassung und Ausblick:

Es konnte gezeigt werden, daß die Abflußdargebotsfunktion des Einzugsgebietes repräsentiert wird sowohl durch die Ganglinien des n-jährlichen Abflusses wie auch durch die Ganglinien der Überschreitungsdauer des Abflusses. Es wurde versucht, durch Vergleich mit den Erkenntnissen der Meteorologie, die Gesetzmäßigkeit der Form der Ganglinien der Überschreitungsdauer des Abflusses für den Bereich der kleinen Wahrscheinlichkeit zu begründen. Die Abflußdargebotsfunktion des Einzugsgebietes ermöglicht die sichere Beurteilung der Abflußgegebenheiten eines Einzugsgebietes für das Abflußregeljahr und stellt so eine wertvolle Grundlage für die Lösung vieler Probleme in der Wasserwirtschaft dar. Verwendet man anstelle des Abflusses als Bezugsgröße die Abflußspende, dann erhält man die Spendendargebotsfunktion des Einzugsgebietes in der allgemeinen Form

$$q = f(t, w),$$

die gewissermaßen in noch höherem Sinne das Vorliegen einer Gesetzmäßigkeit der "Abflußproduktion" des Einzugsgebietes zum Ausdruck bringt.

Es ist mit der Abflußdargebotsfunktion des Einzugsgebietes erstmals die Möglichkeit gegeben, das Abfluß-Zeit-Gesetz des Einzugsgebietes bis in das letzte Detail zu erkennen. Würde man an vielen Punkten eines Einzugsgebietes die Abflußdargebotsfunktion erfassen, dann wäre man in der Lage, die Änderung der Funktion entlang des Gewässerlaufes - bedingt durch die fortlaufende Überlagerung des jeweils hinzukommenden Einzugsgebietes - zu erkennen. Es liegt im Bereich des Möglichen, daß man dann die Gesetzmäßigkeiten dieser Änderung erfassen kann. Vielleicht ist damit die Grundlage gegeben, bei Einzugsgebieten, in denen nur wenige beobachtete Teilsteeinzugsgebiete vorhanden sind, die Abfluß(-spenden-)dargebotsfunktion für jeden beliebigen Punkt des Einzugsgebietes abzuleiten. Bei Verwendung der Abflußdargebotsfunktion des Einzugsgebietes als Testfunktion im Rahmen einer Trenduntersuchung für den Abfluß eines Einzugsgebietes ergibt sich die Möglichkeit, Veränderungen der Gesetzmäßigkeit des Abflußdargebotes innerhalb des gesamten Abflußbereiches aufzuzeigen und diese sowohl zeitlich wie auch örtlich zu lokalisieren.

Die vorliegende Darstellung der Abflußdargebotsfunktion des Einzugsgebietes kann nur als ein bescheidener Anfang gewertet werden und es ist heute noch nicht abzusehen, welche Möglichkeiten ihre Anwendung im Rahmen der Hydrologie mit sich bringt. Zweifellos wäre es im weiteren interessant und wissenswert, wenn jeder Donaustaat an einem oder an zwei Hauptpegeln in seinem Donauabschnitt eine Abflußdargebotsfunktion erstellt, um erstmalig das Abflußdargebotsgesetz der gesamten Donau erkennen zu können.

L i t e r a t u r:

Lauscher, F.

Anhang 3 zum Jahrbuch 1957.  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.

Schmauß, A.

Kalendermäßige Bindungen der täglichen Temperaturschwankung.  
Heft 51 der Abhandlungen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften,  
München 1941.

Steinhauser, F.

Die Meteorologie des Sonnblicks I. Teil.  
Beiträge zur Hochgebirgsmeteorologie nach Ergebnissen 50 jähriger Beobach-  
tungen des Sonnblicksobservatoriums, Wien 1938.

ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ГИДРОГРАФОВ  
БОЛЬШИХ РЕК ЗА ПЕРИОДЫ ПАВОДКОВ

В. И. Сапожников

LANGFRISTIGE VORHERSAGE VON HOCHWASSER-  
GANGLINIEN GROSSER FLOSSE

W. I. Sapožnikov

Резюме

Рассматриваются способы долгосрочного прогноза гидрографов паводков на больших реках с учетом фактического распределения стока в бассейне и ожидаемого поступления талой и дождевой воды в разных частях бассейна. При оценке ожидаемого поступления воды используются приемы типизации и расчета стока по метеорологическим данным.

Zusammenfassung

Es werden die Verfahren der Langfristprognose für die Hochwasserabflußganglinien großer Flüsse unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verteilung des Abflusses im Einzugsgebiet und des zu erwartenden Zuflusses aus Schmelz- und Regenwasser aus den Zwischeneinzugsgebieten behandelt. Bei der Auswertung des zu erwartenden Wasserzuflusses werden die Verfahren der Typisierung und Berechnung des Abflusses auf der Grundlage meteorologischer Daten benutzt.

При долгосрочном прогнозе гидрографов снеговых и дождевых паводков на больших реках с неравномерным по площади снеготаянием и выпадением дождей бассейны рек делятся на ряд частей, для которых предсказывается объем стока и его распределение во время паводков, а затем рассчитывается добегание предсказанных гидрографов стока к замыкающему створу. В основе методики такого прогноза лежит расчетная модель, позволяющая по фактическим гидрографам стока с каждой выделенной площади бассейна рассчитывать ход стока в замыкающем створе. При этом для верхних частей основной реки и ее крупных притоков берутся наблюдаемые гидрографы в самых верхних створах. Для остальных частей бассейна, ограниченных верхними и нижними створами с расходами воды  $Q_v$  и  $Q_n$ , рассчитываются гидрографы бокового притока  $Q_b$  по разности расходов воды в нижних створах и трансформированных на участке расходов воды  $N_1$  верхних створов

$$Q_{b,t} = Q_{n,t} - \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{\tau=1}^{\tau_1} Q_{v,i,t-\tau+1} \zeta_{i,\tau} \quad [1]$$

где  $\zeta_{i,\tau}$  - ординаты кривой добегания руслового стока на участке (3, 5).

Кривые добегания  $\zeta(\tau)$  определяются с помощью введенного Г.П.Калининым и П.И.Милюковым (2) в практику расчетов перемещения воды по руслу на участках рек уравнения следующего вида

$$\zeta_{\tau} = \frac{1}{\tau_1(n-1)!} \left( \frac{\tau}{\tau_1} \right)^{n-1} e^{-\frac{\tau}{\tau_1}} \quad [2]$$

где  $\zeta_{\tau}$  - ординаты кривой добегания, характеризующие доли расхода воды верхнего створа, протекающие за расчетные интервалы времени  $\Delta t = 1$  через нижний створ,  $\tau$  - время, отсчитываемое от момента поступления воды к верхнему створу участка,  $\tau_1$  - время перемещения объема воды на каждом из характерных участков. Это двухпараметрическое уравнение при раз-

L i t e r a t u r:

- Lauscher, F.                   Anhang 3 zum Jahrbuch 1957.  
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- Schmauß, A.                   Kalendermäßige Bindungen der täglichen Temperaturschwankung.  
Heft 51 der Abhandlungen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften,  
München 1941.
- Steinhauser, F.               Die Meteorologie des Sonnblicks I. Teil.  
Beiträge zur Hochgebirgsmeteorologie nach Ergebnissen 50 jähriger Beobach-  
tungen des Sonnblicksobservatoriums, Wien 1938.

ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ ГИДРОГРАФОВ  
БОЛЬШИХ РЕК ЗА ПЕРИОДЫ ПАВОДКОВ

В. И. Сапожников

LANGFRISTIGE VORHERSAGE VON HOCHWASSER-  
GANGLINIEN GROSSER FLOSSE

W. I. Sapožnikov

Резюме

Рассматриваются способы долгосрочного прогноза гидрографов паводков на больших реках с учетом фактического распределения стока в бассейне и ожидаемого поступления талой и дождевой воды в разных частях бассейна. При оценке ожидаемого поступления воды используются приемы типизации и расчета стока по метеорологическим данным.

Zusammenfassung

Es werden die Verfahren der Langfristprognose für die Hochwasserabflußganglinien großer Flüsse unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verteilung des Abflusses im Einzugsgebiet und des zu erwartenden Zuflusses aus Schmelz- und Regenwasser aus den Zwischeneinzugsgebieten behandelt. Bei der Auswertung des zu erwartenden Wasserzuflusses werden die Verfahren der Typisierung und Berechnung des Abflusses auf der Grundlage meteorologischer Daten benutzt.

При долгосрочном прогнозе гидрографов снеговых и дождевых паводков на больших реках с неравномерным по площади снеготаянием и выпадением дождей бассейны рек делятся на ряд частей, для которых предсказывается объем стока и его распределение во время паводков, а затем рассчитывается добегание предсказанных гидрографов стока к замыкающему створу. В основе методики такого прогноза лежит расчетная модель, позволяющая по фактическим гидрографам стока с каждой выделенной площади бассейна рассчитывать ход стока в замыкающем створе. При этом для верхних частей основной реки и ее крупных притоков берутся наблюдаемые гидрографы в самых верхних створах. Для остальных частей бассейна, ограниченных верхними и нижними створами с расходами воды  $Q_B$  и  $Q_H$ , рассчитываются гидрографы бокового притока  $Q_6$  по разности расходов воды в нижних створах и трансформированных на участке расходов воды  $N_1$  верхних створов

$$Q_{6,t} = Q_{H,t} - \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{\tau=1}^{\tau_1} Q_{B,i,t-\tau+1} \gamma_{i,\tau} \quad [1]$$

где  $\gamma_{\tau}$  - ординаты кривой добегания руслового стока на участке (3, 5).

Кривые добегания  $\gamma(\tau)$  определяются с помощью введенного Г.П.Калининым и П.И.Милюковым (2) в практику расчетов перемещения воды по руслу на участках рек уравнения следующего вида

$$\gamma_{\tau} = \frac{1}{\tau_1(n-1)!} \left( \frac{\tau}{\tau_1} \right)^{n-1} e^{-\frac{\tau}{\tau_1}} \quad [2]$$

где  $\gamma_{\tau}$  - ординаты кривой добегания, характеризующие доли расхода воды верхнего створа, протекающие за расчетные интервалы времени  $\Delta t = 1$  через нижний створ,  $\tau$  - время, отсчитываемое от момента поступления воды к верхнему створу участка,  $\tau_1$  - время перемещения объема воды на каждом из характерных участков. Это двухпараметрическое уравнение при раз-

ных значениях  $\lambda$  и  $\tau_i$  позволяет выразить в широких пределах форму кривых, характеризующих добегание воды в естественных руслах. На каждом из участков параметры  $\lambda$  и  $\tau_i$  определяются подбором, в основном, за время паводков, когда при прохождении ими участков боковой приток отсутствует или является сравнительно постоянной величиной.

На некоторых участках рек из-за большой изменчивости условий добегания стока в зависимости от наполнения русловой сети водой можно получить несколько отличающихся друг от друга переменных кривых добегания  $\zeta(\tau)$  для разных величин стока, проходящего по руслу. Тогда при расчете и прогнозе паводков для определенных значений расходов воды используются переменные  $\zeta(\tau)$ .

Расходы воды  $Q_t$  в замыкающем створе на каждый день паводка рассчитываются по уравнению

$$Q_t = \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{\tau=1}^{\tau_2} Q_{в,i,t-\tau+1} \zeta'_{i,\tau} + \sum_{j=1}^{N_3} \sum_{\tau=1}^{\tau_3} Q_{б,j,t-\tau+1} \zeta'_{j,\tau} \quad [3]$$

где  $N_2$  - число верхних частей бассейна на главной реке и ее крупных притоках с расходами  $Q_{в,i}$ ;  $N_3$  - число остальных частей бассейна с расходами  $Q_{б,j}$ , вычисленными по формуле [1];  $\zeta'_{i,\tau}$  - ординаты частных кривых добегания руслового стока;  $\tau_2$  и  $\tau_3$  - максимальное время добегания стока от частей бассейна к замыкающему створу.

Частные кривые добегания  $\zeta'(\tau)$  для расчета трансформации гидрографов с каждой площади бассейна к замыкающему створу определяются по кривым  $\zeta(\tau)$  от участка к участку, путем последовательного перемножения каждой ординаты одной кривой на все ординаты другой и суммирования произведений в соответствии с интегралом Дюамеля. При правильно выявленных кривых добегания руслового стока рассчитанные гидрографы паводков в замыкающем створе по уравнению [3] хорошо совпадают с фактическими гидрографами. Только при этом условии расчетная модель [3] кладется в основу долгосрочных прогнозов гидрографов стока.

Теперь рассмотрим возможности долгосрочного прогноза гидрографов стока отдельно снеговых и дождевых паводков, а также способы их уточнения.

Долгосрочный прогноз расходов воды  $Q_t$  гидрографов весеннего талого стока в замыкающем створе дается по уравнению

$$Q_t = \sum_{i=1}^N \sum_{\tau=1}^{\tau_i} \frac{y_i}{\bar{y}_i} \bar{Q}_{i,t-\tau+1} \zeta'_{i,\tau} \quad [4]$$

в котором  $Q_{i,t}$  - приведенные к норме расходы воды типовых гидрографов, выбранных по определенным признакам для каждой из  $N$  частей бассейна,  $y_i$  и  $\bar{y}_i$  - ожидаемый в данном году слой весеннего стока и его норма,  $\zeta'_{i,\tau}$  - ординаты частных кривых добегания стока. Приведенные к норме типовые гидрографы с каждой площади с помощью постоянных кривых  $\zeta'(\tau)$  трансформируются прямо к замыкающему створу. Тогда расчеты половодья у этого створа сводятся к суммированию трансформированных типовых гидрографов  $\bar{Q}'_{i,t}$  умноженных на модульные коэффициенты ожидаемого объема стока за половодье  $k_i = \frac{y_i}{\bar{y}_i}$  для каждой из площадей

$$Q_t = \sum_{i=1}^N k_i \bar{Q}'_{i,t} \quad [5]$$

При таком прогнозе учитывается неравномерность весеннего стока и его распределение во время половодья по отдельным частям бассейна, а также добегание стока от этих частей к замыкающему створу.

Необходимые при прогнозе по формуле [5] величины объема стока за половодье предсказываются по определяющим их факторам для каждой выделенной площади бассейна. Методика такого прог-

ноза в СССР широко используется на практике и дает хорошие результаты (1, 4). Исходными материалами для прогноза по каждой площади служат максимальные запасы воды в снежном покрове и ледяной корке, жидкие осадки за половодье, характеристики влагосодержания и промерзания почвы.

Весенние паводки на реках проходят обычно в рамках определенного отрезка времени от таяния накопившегося за зиму снега. На форме их гидрографов отражаются особенности развития весенних процессов, повторяющихся с некоторыми изменениями из года в год в условиях конкретного бассейна. Наибольшее влияние на форму половодья оказывает объем весеннего стока и ход снеготаяния.

При долгосрочных прогнозах снеговых паводков по уравнению [4] используются приемы типизации их гидрографов для каждой площади по ряду признаков в развитии весенних гидрометеорологических процессов. Для этих целей могут приниматься: сроки устойчивого перехода температуры воздуха весной через  $0^{\circ}$ , сроки накопления некоторой ее суммы, сроки стаивания определенной части снеготаяния, начала водоотдачи из снежного покрова и поступления воды в речную сеть и др. В качестве характеристики дружности последующего снеготаяния принимается ожидаемая по прогнозу погоды средняя температура воздуха, например, за пятидневку после дня составления прогноза.

Чтобы осуществить типизацию снеговых паводков, берутся за многолетний период наблюдаемые гидрографы для верхних частей бассейна и рассчитанные по уравнению [1] для остальных частей. По принятым срокам весенние паводки делятся на ранние, средние и поздние или просто на ранние и поздние. В каждой из этих групп паводков по ожидаемой температуре воздуха половодья делятся на дружные, средние по дружности и недружные или просто на дружные и недружные. Для этих подгрупп паводков определяются типовые гидрографы, отражающие средние климатические и гидрологические условия формирования весеннего стока в данных районах. При такой типизации гидрографов учитывается фактическое составление весенних гидрометеорологических процессов и ожидаемая температура воздуха на последующее время, полученная по данным о синоптических процессах, происходящих на большой территории.

В качестве примера рассмотрим метод долгосрочного прогноза гидрографа весеннего половодья р. Оки у г. Горбатова (площадь водосбора  $244\ 000\ \text{км}^2$ ) (7), бассейн разделен на четыре части: Ока до Каширы ( $68\ 700\ \text{км}^2$ ), Кашира - Касимов ( $61\ 300\ \text{км}^2$ ), Касимов - Муром ( $52\ 000\ \text{км}^2$ ) и Муром - Горбатов ( $56\ 000\ \text{км}^2$ ). Ожидаемый объем весеннего стока для этих площадей перед началом половодья определяется по зависимостям его от снеготаяния и характеристик потерь стока (1). Распределение ожидаемого весеннего стока для четырех частей бассейна предсказывается по типовым гидрографам, учитывающим начальный ход снеготаяния на площадях.

По температуре воздуха и максимальным запасам воды в снеге  $h_{\text{макс}}$ , в мм, для каждой части бассейна определяется ход коэффициентов

$$\alpha = \frac{h_{\text{макс}}}{\sum_{t_0}^t \theta_+^{\circ}}$$

где  $\sum_{t_0}^t \theta_+^{\circ}$  - сумма градусов положительной температуры воздуха от даты  $t_0$  - перехода через  $0^{\circ}$  - до  $t$ . Расчеты проводятся до тех дней, когда величина  $\alpha$  уменьшаясь становится равной пяти. Эти сроки принимаются за дату прогноза на каждой площади. Дружность последующего снеготаяния характеризуется ожидаемой средней пентадной температурой воздуха.

Для каждой площади определялись четыре типа гидрографов: ранние - дружные и недружные

и поздние - дружные и недружные. Расчет трансформации этих гидрографов до замыкающего створа производился по частным кривым добегания воды по руслу  $v(\tau)$ . Полученные таким образом гидрографы  $\bar{Q}_{i,t}$  сведены в таблицы.

Пример долгосрочного прогноза гидрографа половодья р. Оки у г. Горбатова приведен на рис.1.

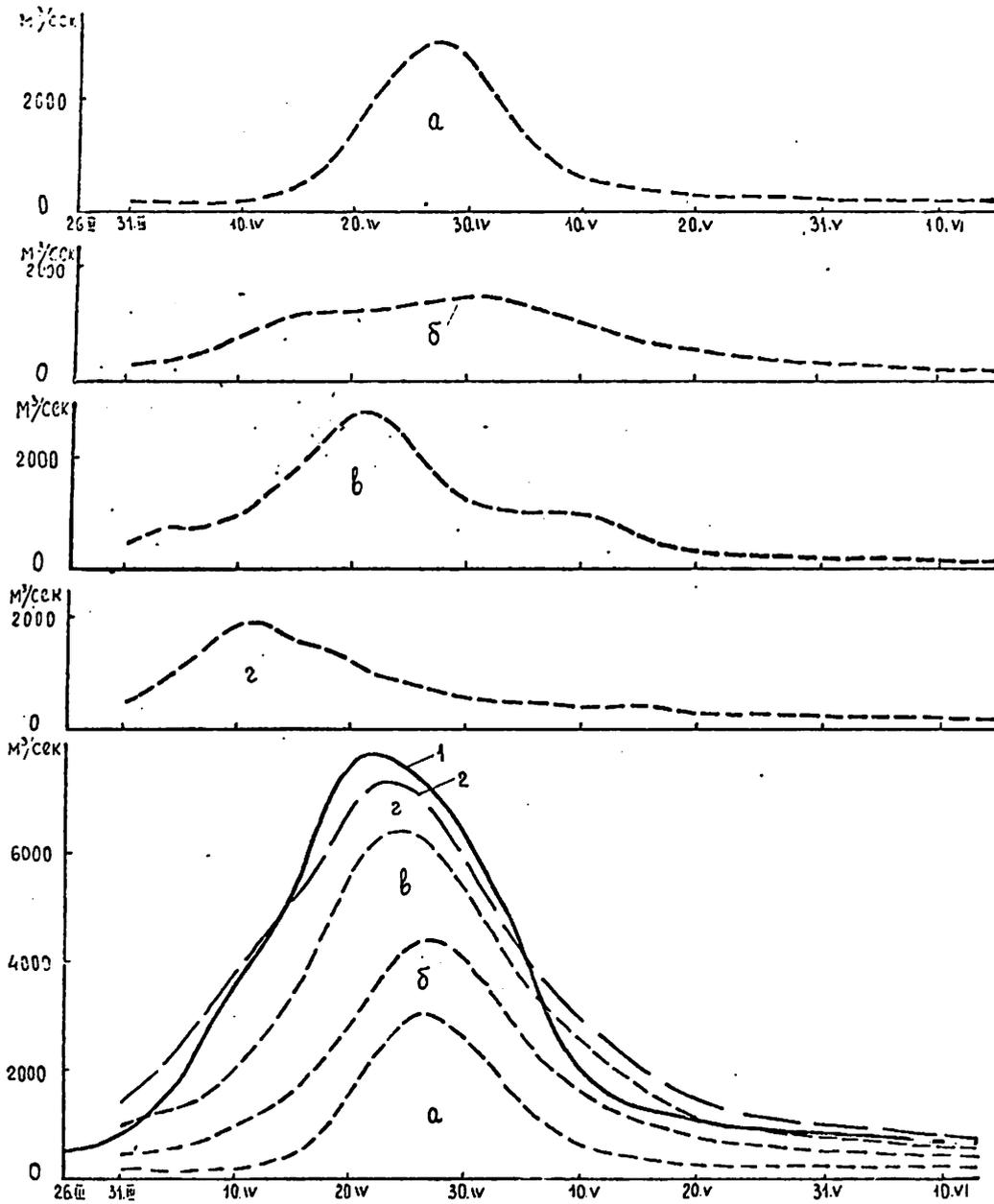


Рис.1 Фактический (1) и предсказанный (2) по стоку с четырех частей бассейна гидрографов р. Оки у г. Горбатова за половодье 1968 г. а) Ока-Кашира, б) Кашира - Касимов, в) Касимов - Муром и г) Муром - Горбатов.

Прогноз составляется 31 марта 1968 года, когда на двух частях бассейна дата  $\zeta = 5$  уже наступила, а на двух остальных частях эта дата определялась с учетом прогноза температуры

воздуха. По выявленным датам прогноза и ожидаемой средней пентадной температуре воздуха в этом году приняты следующие типы гидрографов: ранний дружный (Ока-Кашира), ранний недружный (Кашира-Касимов), ранний дружный (Касимов-Муром) и ранний недружный (Муром-Горбатов).

Модульные коэффициенты ожидаемого объема половодья равны: для Оки у Кашира  $k_1 = 0,74$ , для остальных трех нижних частей соответственно  $k_2 = 0,80$ ;  $k_3 = 1,32$  и  $k_4 = 0,83$ . Приведенные к норме и отнесенные к створу на Оке у Горбатова типовые гидрографы  $\bar{Q}'_{i,t}$  умножаются на соответствующие модульные коэффициенты  $k_i$  ожидаемого весеннего стока и суммируются [5]. Для наглядности на рис. 1 показаны трансформированные к замыкающему створу гидрографы с каждой из четырех частей бассейна.

Долгосрочные прогнозы гидрографов дождевых паводков составлять крайне трудно, в основном, из-за сложности учета потерь стока от выпавших дождей и отсутствия надежных количественных прогнозов дождей на последующее время.

Прогноз гидрографов паводков по осадкам на каждой части бассейна производится следующим образом. Ожидаемый объем стока за паводок можно получить всякий раз после прекращения обильных осадков по зависимостям его от суммы осадков, формирующих паводков, и характеристик потерь стока. По таким зависимостям для паводка или для осадков за определенные интервалы времени находятся ожидаемые величины стока  $h_c = \eta h_0$  или  $h_c = h_0 - h_n$ , где  $\eta$  - коэффициент стока,  $h_0$  - осадки,  $h_n$  - потери. Затем полученный слой стока трансформируется к нижним створам участков при помощи распределения единичных паводков  $P(\tau)$ , сформированных осадками  $h_0$  за принятые интервалы времени,

$$Q_t = \sum_{\tau=1}^{\tau_M} B h_{c,t-\tau+1} P_{\tau} \quad [6]$$

где  $Q_t$  - расходы воды в нижнем створе каждой из выделенных частей бассейна,  $B$  - коэффициент перехода от слоя стока, в мм, к расходам воды, в  $m^3/сек$ . Вычисленные по формуле [6] расходы воды для  $N$  частей бассейна при помощи частных кривых добегания руслового стока  $\zeta'(\tau)$  трансформируются к замыкающему створу

$$Q_t = \sum_{i=1}^N \sum_{\tau=1}^{\tau_M} Q_{i,t-\tau+1} \cdot \zeta'_{i,\tau} \quad [7]$$

Если учесть, что талая и дождевая вода быстро стекает в русла рек, то без существенной потери заблаговременности сток паводков можно определять по притоку воды в речную сеть, рассчитанному по гидрометрическим данным. Чем больше развита сеть расходных створов на малых реках, тем с большим приближением к склоновому стоку определяется приток воды в речную сеть (5). Естественно, что по гидрометрическим данным объем дождевых паводков определяется более точно, чем по осадкам.

По мере развития половодья и дождевых паводков, когда значительная часть талой и дождевой воды уже поступила в русла рек, производится уточнение долгосрочных прогнозов с учетом фактического притока воды в речную сеть (6, 7, 8). В этом случае прогноз осуществляется по уравнению:

$$Q_{n+\tau} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=n+\tau-1}^n q_{i,j} R'_{i,\tau} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=n}^{n+\tau} q_{i,j} R'_{i,\tau} \quad [8]$$

где  $Q_{n+\tau}$  - предсказанные расходы воды в замыкающем створе с заблаговременностью  $\tau$  суток от момента прогноза  $n$ ;  $N$  - число площадей, на которое разделен бассейн;  $q$  - приток воды в речную сеть, вычисляется по гидрометрическим данным до момента прогноза и берется по типовым кривым его спада на период заблаговременности прогноза,  $R'_i$  - ординаты частных кривых добегания руслового стока с частей бассейна до замыкающего створа. Пос-

ледние определяются по кривым добегаания  $R(\tau), \zeta'(\tau)$ , позволяющим трансформировать соответственно приток к нижним створам участков и расходы воды в этих створах к замыкающему бассейн створу. Приток в речную сеть отдельных частей бассейна вычисляется по уравнениям

$$q_1 = Q_{1,н} + \frac{\Delta W_1}{\Delta t} \quad [9]$$

$$q_2 = Q_{2,н} - Q_{2,в} + \frac{\Delta W_2}{\Delta t} \quad [10]$$

в которых  $Q_{в}$  и  $Q_{н}$  - расходы воды в верхних и нижних створах участков,  $\Delta W_1$  и  $\Delta W_2$  - изменение русловых объемов воды за время  $\Delta t$  для верхних и остальных частей бассейна.

Для определения притока воды в речную сеть частей бассейна за период заблаговременности прогноза  $T$  используются различные приемы [7,8]. Обычно период  $T$  делится на два периода  $T_1$  и  $T_2$ . За время  $T_1$ , осуществляется переход от фактического притока в момент прогноза до типового его значения взятого с учетом ожидаемого объема в конце этого периода. Отрезок времени  $T_2$  характеризуется типовым ходом притока:  $q_{2,t} = k\bar{q}_t$ , где  $k = \frac{y}{\bar{y}}$  - модульный коэффициент объема половодья  $y$  при норме  $\bar{y}$ . Продолжительность периода  $T$  принимается обычно до 5-10 суток, а периода  $T_2$  - до 20-60 суток.

За время  $T_1$  приток на спаде для половодья рассчитывается по формуле

$$q_t = q_n e^{-a \frac{t}{T_1} \lg \frac{q_n}{k\bar{q}_1}} \quad [11]$$

где  $q_n$  и  $q_t$  - приток воды в речную сеть в момент прогноза и  $t$  дней спустя,  $k$  - модульный коэффициент ожидаемого объема половодья за время спада притока или за все половодье;  $\bar{q}_1$  - среднее многолетнее значение притока в конце периода  $T_1$ ,  $a$  - постоянный коэффициент. При близком к линейному изменению притока за время  $T_1$  и известном объеме паводка приток вычисляется по формуле:

$$q_t = \left( 1 - \frac{t}{T_1} \right) q_n + \frac{kt}{T_1} \bar{q}_1 \quad [12]$$

Здесь обозначения те же, что и в [11]. Предсказание расходов воды  $Q_{n+\tau}$  во время половодья по фактическим до момента прогноза и ожидаемым на последующее время расходам воды на частях бассейна производится по уравнению:

$$Q_{n+\tau} = \sum_{i=1}^N \frac{n}{\sum_{j=n+\tau-\zeta_i+1}^n} Q_{i,j} \zeta'_{i,\tau} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=n}^{n+\tau} Q_{i,j} \zeta'_{i,\tau} \quad [13]$$

в котором  $Q_i$  - расходы воды с частей бассейна,  $\zeta'_{i,\tau}$  - частные кривые добегаания стока от верхних к замыкающему створу; остальные обозначения те же, что и в [8]. Фактические расходы воды до момента составления прогноза  $n$  здесь берутся наблюдаемые в верхних створах и рассчитываются по формуле [1] для нижних створов участков. Расходы воды по всем частям бассейна на период заблаговременности  $T$  предсказываются способами подобными рассмотренным выше для притока. За период  $T_1$  расходы воды вычисляются по формулам вида [11] и [12]. За время  $T_2$  расходы берутся по типовым кривым или принимаются постоянными, равными предпаводочным их значениям.

Проиллюстрируем прогноз дождевого паводка по уравнению [13] на примере р. Лены у г. Якутска (915 000 км<sup>2</sup>) (8). Бассейн разделен на пять частей: Лена до Змеинова (144 000 км<sup>2</sup>), р. Витим до Бодайбо (186 000 км<sup>2</sup>), Змеинова, Бодайбо - Крестовское (117 000 км<sup>2</sup>), Крестовское - Солянка (326 000 км<sup>2</sup>) и Солянка - Якутск (142 000 км<sup>2</sup>). Для участков между основными створами выявлены кривые добегаания  $\zeta(\tau)$  и по ним получены частные кривые добега-

ния  $Q'(\tau)$ . По уравнению [3] рассчитывается ход стока Лены у Якутска. При этом для верхних частей бассейна - Лены до Змеинова, Витим до Бодайбо - берутся наблюдаемые расходы воды. Для остальных частей, расположенных между основными створами, принимаются расходы воды бокового притока, вычисленные по уравнению [1]. Рассчитанные расходы воды Лены у Якутска показаны на рис.2 до даты составления прогноза - 23 сентября 1957 г.

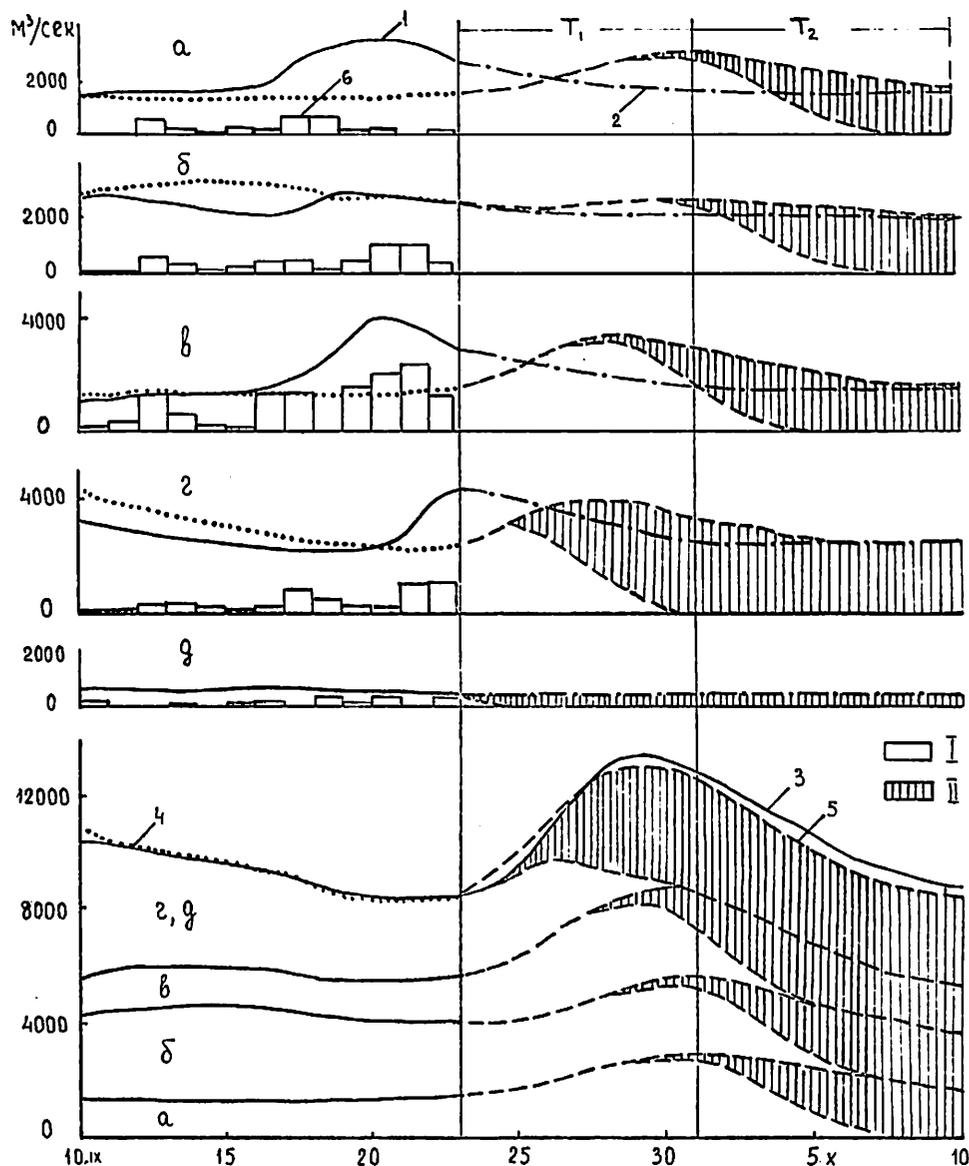


Рис.2. Прогноз дождевого паводка р. Лены у г. Якутска, составленный 23 сентября 1957 года по фактическим [1] и предсказанным [2] за периоды  $T_1$  и  $T_2$  расходам воды с пяти частей бассейна: а) р. Лена до Змеинова, б) р. Витим до Бодайбо, в) Змеиново, Бодайбо-Крестовское, г) Крестовское-Солянка, д) Солянка-Якутск.

Наблюдаемые [3], рассчитанные [4] и предсказанные [5] расходы воды Лены у Якутска с выделением составляющих от фактических [1] и предсказанных [11] расходов воды; осадки [6].

Прогноз паводков по такой методике дается обычно после прекращения обильных осадков и при достижении максимальных расходов воды на нескольких частях бассейна. Для каждой части предсказываются расходы воды на периоды  $T_1 = 8$  суткам и  $T_2 = 10$  суткам. В рассматриваемом случае по всем частям на период  $T_1$  предсказывается спад расходов воды, а за период  $T_2$  ожидаемые расходы воды берутся равными по величине предпаводочным расходам воды. Полученные таким образом фактические и предсказанные расходы воды от каждой части бассейна с помощью частных кривых  $\zeta'(\tau)$  трансформируются к замыкающему створу у Якутска и суммируются по уравнению [13]. Для наглядности на рис. 2 предсказанные расходы воды расчленены на составляющие, образованные фактическими и предсказанными расходами воды на каждой из выделенных площадей.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Змиева Е.С. Прогнозы притока воды к Куйбышевскому и Волгоградскому водохранилищам. М., Гидрометеоиздат, 1964 г.
2. Калинин Г.П., Милюков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс. Труды ЦИП, вып. 66, 1958 г.
3. аноним Руководство по гидрологическим прогнозам, вып. 1. Краткосрочные прогнозы расходов и уровней воды на реках. Гидрометеорологическое издательство. Л., 1964 г.
4. аноним Руководство по гидроологическим прогнозам, вып. 2. Долгосрочные прогнозы стока равнинных рек. Гидрометеоиздат, Л., 1963г.
5. Сапожников В.И. Прогноз стока рек в бассейне Волги по русловым запасам воды и притоку в речную сеть. Гидрометеоиздат. М., 1960 г.
6. Сапожников В.И. Приближенный способ учета неравномерности поступления воды в речную сеть при прогнозе стока. Метеорология и гидрология, № 9, 1964 г.
7. Сапожников В.И. О долгосрочном прогнозе гидрографа половодья р. Оки у Муроме с учетом пространственной неравномерности стока. Труды Гидрометцентра СССР, вып. 138, 1974 г.
8. Сапожников В.И., Рубцова З.И. Прогноз дождевых паводков на р. Лене у с. Табага по данным о притоке воды в русла с разных частей бассейна. Труды Гидрометцентра СССР, вып. 138, 1974 г.

## STRUKTURPROGNOSEN FÜR DEN DURCH SPEICHER VERÄNDERTEN ABFLUSS

P.-G. Franke und R.-P. Spiegel

## СТРУКТУРНЫЕ ПРОГНОЗЫ ДЛЯ ИЗМЕНЕННОГО ВОДОХРАНИЛИЩЕМ СТОКА

П. Г. Франке и Р. П. Шпигель

### Zusammenfassung:

Anhand des Lechspeichers Forggensee wurde die Strukturveränderung des natürlichen Abflusses sowohl durch den zeitlichen direkten Vergleich Zufluß - Abgabe als auch durch die Gegenüberstellung der Abflußbeobachtungen am Pegel Landsberg vor und nach dem Bau des Speichers aufgezeigt.

Das vorgestellte Modell stellt eine Möglichkeit zur Erfassung des Speicherbetriebes dar. Mit den dabei definierten Abhängigkeiten kann von der Struktur des Zuflusses auf deren Veränderung durch die Speicherstreuung geschlossen werden. Der Zufluß zum Speicher wird in seiner Eigenschaft als Zufallsprozeß aus der historischen Reihe geschätzt. Die Modellergebnisse liefern Aussagen über die künftig zu erwartenden Auswirkungen des Eingriffs.

### Резюме:

С помощью Лехского водохранилища Форггензее были выявлены структурные изменения в естественном стоке как посредством прямого сравнения во времени приток - отдача, так и противопоставлением наблюдений стока по Ландсбергскому футштоку до и после строительства хранилища.

Представленная модель дает одну возможность учета для предприятия накопления. С определенными при этом зависимостями можно делать выводы о структуре прилива и ее изменениях из-за рассеивания накопления. Прилив к накопителю по своим свойствам оценивается как случайный процесс в историческом ряду. Результаты, полученные из модели, поставляют высказывания об ожидаемых в будущем последствиях вмешательства.

### 1. Einleitung

Die Berücksichtigung der Strukturveränderung des natürlichen Abflusses bei Flüssen mit speicherfähigen Kraftwerken ist für eine Abflußvorhersage von grundsätzlicher Bedeutung.

Diese Strukturveränderung ist durch eine Reihe von miteinander konkurrierenden Aufgaben des Speichers bedingt, wie Hochwasserspitzen zu kappen, Niederwasser aufzuhöhen, das Dargebot auf den Bedarf auszurichten und nicht zuletzt den Erholungswert der Landschaft zu steigern.

Ein stochastisches Modell zur Ermittlung der Speicherwirkung wird vorgestellt; die damit herzuleitende Aussage über die Strukturveränderung des Abflusses durch den Speicher wird anhand einer Analyse des Lechsystems aufgezeigt.

Ein Großteil der Arbeiten wurde im Rahmen des Teilprojektes C 2 des Sonderforschungsbereiches 81 an der Technischen Universität München durchgeführt, dessen Ziel eine optimale Einbeziehung des natürlichen Wasserdargebotes in ein überregionales System ist.

### 2. Hydrologische Gegebenheiten des Lech

Die eingehende Kenntnis des Abflußverhaltens der Nebenflüsse der Donau leistet einen wesentlichen Beitrag zur Erfassung des gesamten Abflußgeschehens.

Neben Inn und Isar ist der Lech, der ein Einzugsgebiet von 4 120 km<sup>2</sup> hat, wegen des großen Wasserdargebotes der wichtigste Nebenfluß der Donau innerhalb der Bundesrepublik Deutschland. Er entspringt im

Formarinsee in den Lechtaler Alpen. Südlich der Stadt Füssen wechselt er von tiroler auf bayerisches Gebiet und fließt an den Städten Schongau, Landsberg und Augsburg vorbei nach Norden. Etwas unterstrom von Donauwörth mündet er nach rund 260 km in die Donau (Abb. 1).

Ein Vergleich der Wasserführung der Donau und des Lechs an dessen Mündung zeigt bei der maximalen Hochwasserführung HHQ sogar ein Übergewicht des Nebenflusses (1,25-fache Wassermenge der Donau). Jedoch auch bei Niederwasserführung der Donau würden wenige Kubikmeter pro Sekunde Abflußrückhalt durch den im Oberlauf des Lechs befindlichen Speicher erhebliche Frachtverluste für die Lastenkähne der Donauschiffahrt bedeuten. Die Wasserführung des Lechs schwankt ferner in weiteren Grenzen als die der Donau und wird insbesondere von der Schneeschmelze bestimmt (Abb. 2).

Bei Füssen, an der Stelle des abflußverändernden Eingriffs, beträgt das durchschnittliche Jahresdargebot rund  $2,1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ . Davon fließen etwa drei Viertel im Sommerhalbjahr und nur ein Viertel in der Zeit von Oktober bis März zu. Als Maximum und Minimum sind Wassermengen von  $915 \text{ m}^3$  bzw.  $10 \text{ m}^3$  in der Sekunde gemessen worden.

### 3. Der Lechspeicher Forggensee

Im Jahre 1954 wurde bei Füssen der Lechspeicher Roßhaupten - der Forggensee - fertiggestellt. Der Gesamthalt von rd.  $165 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  Inhalt gliedert sich auf in  $135 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  Nutzstauraum,  $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  Hochwasserschutzraum und ca.  $15 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  Totstauraum. Dieser Speicher bildet den Anfang einer Staustufenkette von 15 weiteren Kraftwerken bis hin nach Landsberg.

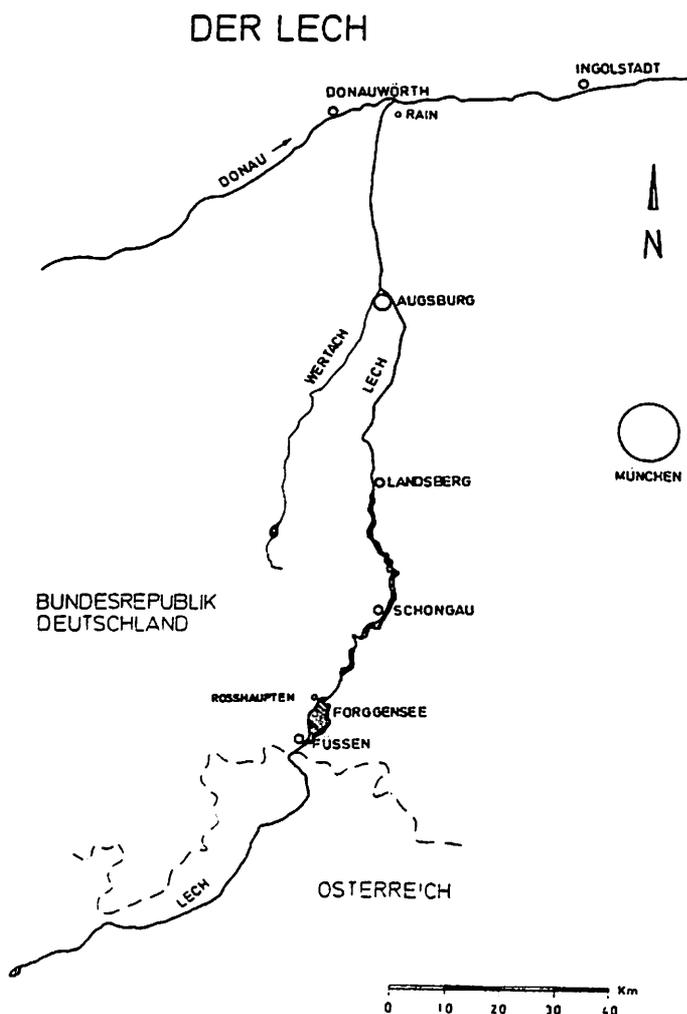


Abb. 1

#### 3.1 Speicherjahrgang

Die Energieerzeugung im Kopfkraftwerk, wie auch in den unterhalb liegenden Kraftwerken soll zum Teil vom Sommer mit großer Wasserdarbietung auf den Winter mit geringer Wasserzufuhr aber großem Energiebedarf verschoben werden; dies führt zwangsläufig zu einer Verlagerung des natürlichen Abflusses. Die bedarfsorientierte Ausnutzung der sehr unterschiedlichen Wasserführungen bedingt die Notwendigkeit einer Speicherung.

Der Jahrgang des Speichers spiegelt die verschiedenen und jahreszeitlich sich ändernden Aufgaben wieder, wobei das Erreichen des Stauziels zum 15. Juni die Speicherstrategie am wesentlichsten beeinflusst (Bild 3).

Die Dauer der Abstauphase des Speichers von immerhin 6 Monaten (Abgabe > Zufluß), während für die Aufstauperiode nur rund 1,5 Monate (Zufluß > Abgabe) ohne Berücksichtigung des Aprils - nur zögernder Aufstau - zur Verfügung stehen, läßt eine Zeitdiskretisierung möglich erscheinen, wie sie L. Beard in seinem Kurzzeit - Abflußmodell vorschlägt.

### 3.2 Mathematische Grundlagen für ein Modell

Das Speichergeschehen wird als ein zwar deterministisch gesteuerter, aber vom Zufallsprozeß Zufluß in seinem Verlauf bestimmter Vorgang betrachtet.

Der Speicherinhalt  $S_{t+1}$  zum Zeitpunkt  $t + 1$ ,  $t \in Z$  ist von  $S_t$  und dem im Zeitraum  $(t, t+1)$  erfolgenden Zufluß  $Z_{(t)}$  und Abfluß  $A_{(t)}$  abhängig. Es gilt die Beziehung

$$S_{t+1} = \begin{cases} 0 & \text{für } S_t + Z_{(t)} - A_{(t)} \leq 0 \\ S_t + Z_{(t)} - A_{(t)} & \text{für } S_t + Z_{(t)} - A_{(t)} \leq K \quad t=0,1,\dots \\ K & \text{für } S_t + Z_{(t)} - A_{(t)} > K \end{cases}$$

wobei  $K$  die nutzbare Kapazität des Speichers darstellt.

Der Zufallsprozeß Zufluß wird, wobei die Zuflußmengen  $Z_{(t)}$  während verschiedener Zeiteinheiten als stochastisch unabhängig angenommen werden, durch die Verteilungsfunktionen bzw. Dichten

$$F(t; z) = W(Z_{(t)} \leq z) \text{ und } f(t; z) = \frac{d}{dz} F(t; z)$$

beschrieben.

Die Abgabe im Zeitraum  $(t, t+1)$  sei für alle  $t \in Z$  in Abhängigkeit vom zum Zeitpunkt  $t$  vorhandenen Inhalt  $S_t$  und dem in  $(t, t+1)$  erfolgenden Zufluß festgelegt.

$$A_{(t)} = \alpha(t; Z_{(t)}, S_t) \quad t = 0, 1, 2, \dots$$

Um die zeitliche Aufeinanderfolge der zufälligen Speicherinhalte zu beschreiben, werden die Zufallsvariablen diskretisiert. Die Bereiche werden definiert durch

$$SB_j = \begin{cases} \{S_t \mid S_t = S_{t-1} + Z_{(t-1)} - A_{(t-1)} \leq 0\} & j = 0 \\ \{S_t \mid (j-1) \cdot K/n < S_t \leq j \cdot K/n\} & j = 1, 2, \dots, n \\ \{S_t \mid S_t = S_{t-1} + Z_{(t-1)} - A_{(t-1)} > K\} & j = n+1 \end{cases}$$

Die Zufälligkeit der Variablen  $\{S_t \mid t \in Z\}$  liegt hier nicht in der zufälligen Annahme eines bestimmten Wertes, sondern in dessen Zugehörigkeit zu einem dieser Bereiche  $SB_j$ .

Aufgrund der Übergangsgleichung und der Abgaberegeln können aus dem Zufallsprozeß Zufluß die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen möglichen Übergänge

$$P_{i,j}(t) = W(S_{t+1} \in SB_i \mid S_t \in SB_j) \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, n+1$$

berechnet werden.

Aus diesen Übergangswahrscheinlichkeiten lassen sich die Wahrscheinlichkeiten der Speicherinhalte zu Beginn der einzelnen Zeiteinheiten nach der Beziehung

$$g(t+1) = P(t) g(t)$$

mit

$$g_j(t) = W(S_t \in SB_j) \quad j = 0, 1, 2, \dots, n+1$$

bestimmen.

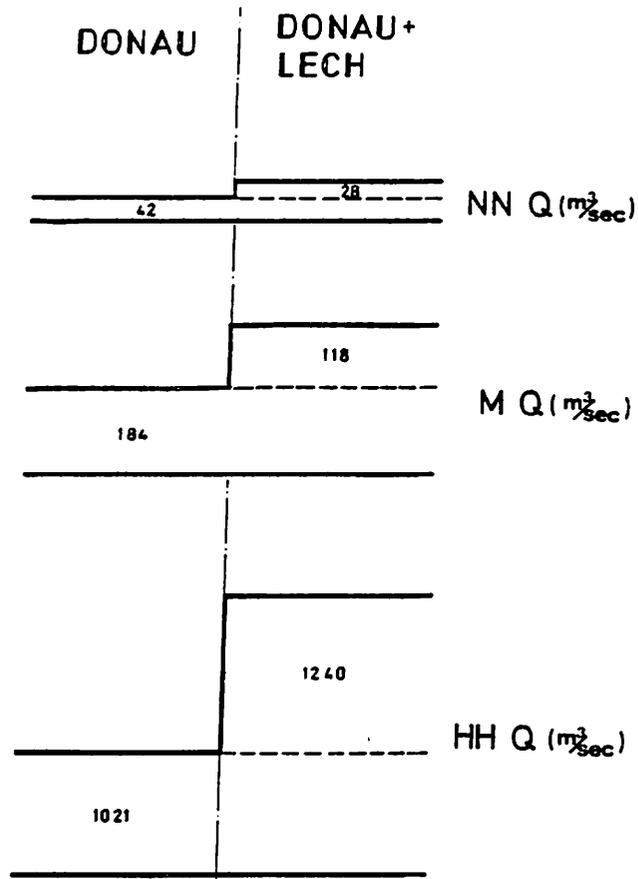


Abb. 2

**FORGGENSEE**  
1955 - 1974

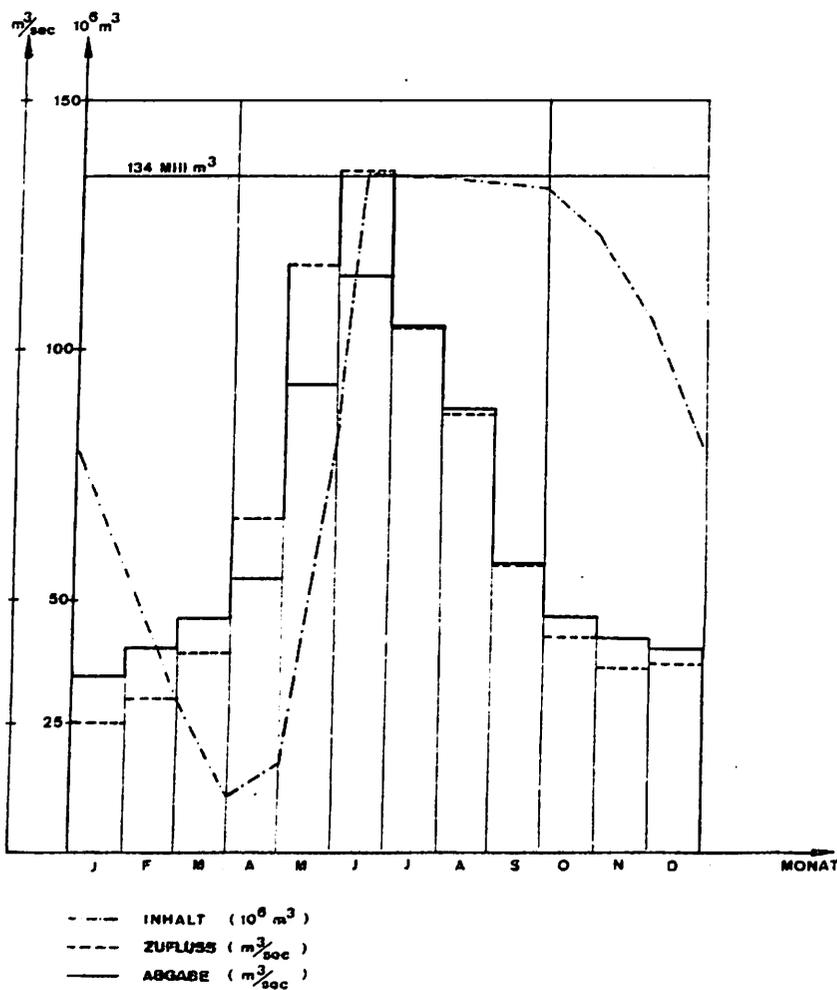


Abb. 3

Zusammen mit der Zuflußdichte können hieraus dann die Abgabeverteilungen mit der Beziehung

$$H(t;a) = W(a_{(t)} \leq a) = \sum_{j=0}^{n+1} g_j(t) \int_{R_j(t;a)} f(t;z) dz,$$

wobei  $R_j(t;a) = \{ z \mid \alpha(t;z,SB_j) \leq a \}$ ,

errechnet werden.

Aus der historischen Reihe der Abflußwerte wird der Zufallsprozeß Zufluß geschätzt. Mit Hilfe der variablen Abgaberegeln kann der Abfluß aus dem Speicher, also der veränderte natürliche Abfluß bestimmt werden. Die Modellergebnisse liefern folglich Aussagen über die zu erwartenden Wirkungen des Eingriffs - also Strukturprognosen.

#### 4. Strukturveränderung des natürlichen Abflusses

##### 4.1 Monatsbasis

Mit Hilfe des Vergleichs der Ganglinien der Monatsmittelwerte von Zufluß und Abgabe am bestehenden System über einen Zeitraum von 20 Jahren können weitere Schlüsse auf die Speicherwirkung gezogen werden. Die Jahresperiode dieses Flusses ist klar zu erkennen; ebenso schwingen die Speicherabgabe wie der Zufluß mit derselben Frequenz; nur die Amplitude der Abgabe ist merklich geringer. Die saisonale Schwankungsbreite wird also verringert (Abb. 4).

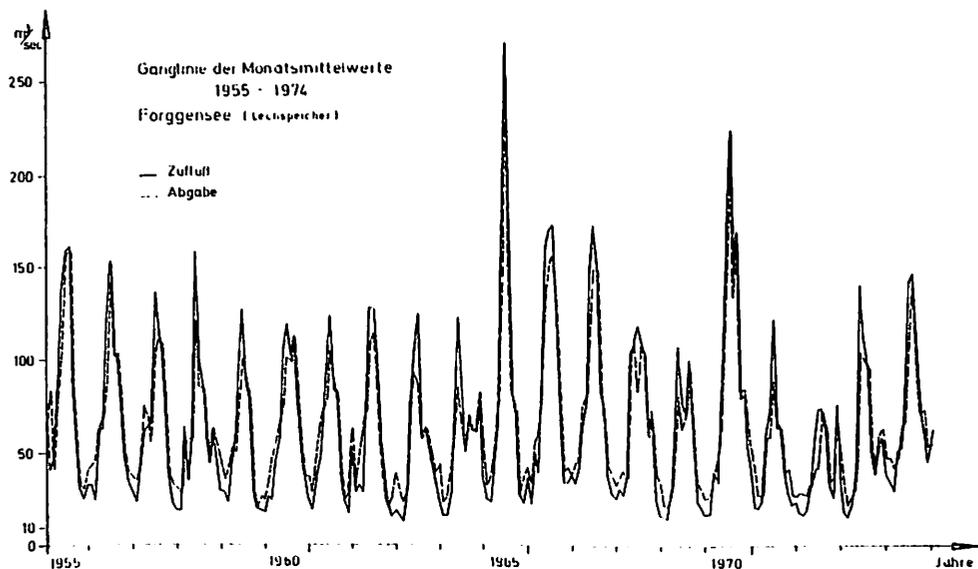


Abb. 4

Auch bei der Gegenüberstellung der Variationskoeffizienten

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} / \bar{x}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

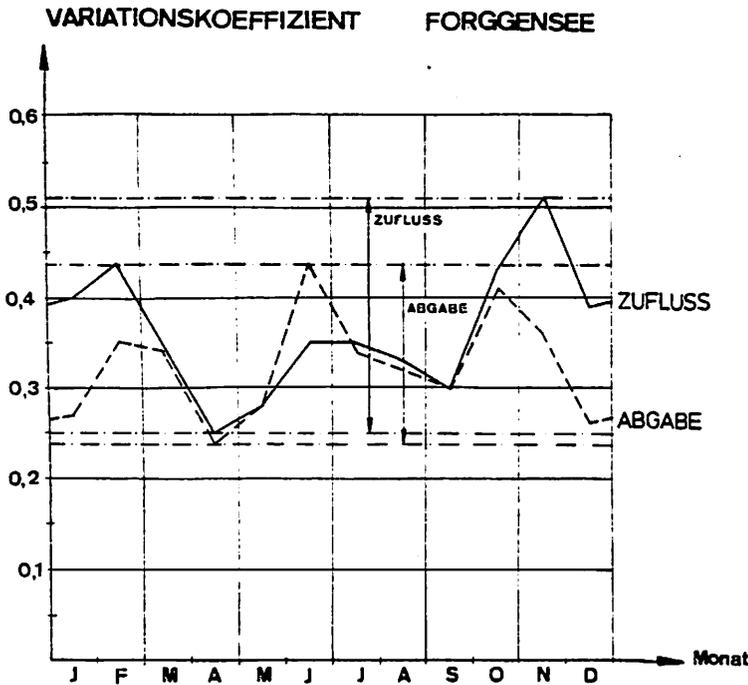


Abb. 5

HINWEISE:

1.  $150 \text{ m}^3/\text{sec}$  mittl. Tageszufluß — in 23% der Fälle überschritten
2. bei 40% der Fälle — mehr als  $100 \text{ m}^3/\text{sec}$  Abgabe
3. in 150 Fällen der Werte (620) — weniger als  $67 \text{ m}^3/\text{sec}$  Abgabe

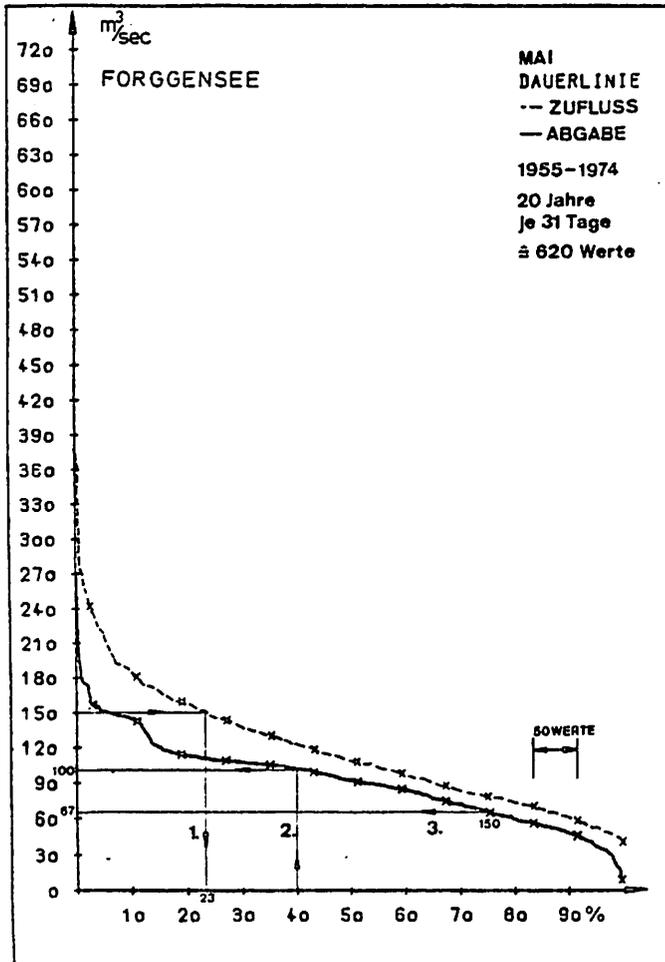


Abb. 6

von Zufluß und Abgabe der verschiedenen Monate wird die Strukturveränderung deutlich (Abb. 5). In allen Monaten, mit Ausnahme des Juni, liegt dieses dimensionslose Streuungsmaß mit dem Mittelwert als Einheit, für den Zufluß mehr oder minder deutlich über dem der Abgabe. Der Variationskoeffizient für die Abgabe ist nur im Juni größer als der des Zuflusses. Trotzdem ist die Bandbreite der Abgabe über das ganze Jahr erheblich schmaler.

4.2 Tagesbasis

Weitere Untersuchungen wurden auch für Tageswerte durchgeführt. Durch Berechnung der Dauerlinie der einzelnen Monate, wobei als Darstellungsart die Oberschreitungswahrscheinlichkeit gewählt wurde, werden die Erwartungswerte des Zuflusses und der Abgabe kenntlich gemacht. Der Erwartungswert der täglichen mittleren Abgabewassermenge liegt im Mai - Aufstauphase - deutlich unter dem des mittleren Zuflusses (Abb. 6), im Juli - Konstanthaltung des Wasserspiegels - ungefähr auf gleichem Niveau, während im Februar - Abstauphase -, um eine bedarfsorientierte Ausnutzung zu gewährleisten, die Abgabe über dem Zufluß liegt.

Andererseits wird deutlich, daß gerade in der Auf- bzw. Abstauphase eine monatliche Verschiebung des Abflußgeschehens stattfindet. Die Integralwerte über die Dauerlinien für Zufluß und Abgabe - Zuflußfülle, Abgabefülle - stimmen nicht miteinander überein.

4.3 Pegel Landsberg

Die Veränderung der Struktur des Abflußgeschehens wurde am Pegel Landsberg untersucht. Gerade dieser Pegel nimmt eine Sonderstellung hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Abflußdaten ein, da ein seit Jahrhunderten bestehendes Wehr eine nahezu konstante Flußsohle garantiert. Gerade bei den stark geschiebeführenden Gebirgsflüssen bereitet die instabile Sohle oft erhebliche Schwierigkeiten bei der Abflußmengenbestimmung.

Das Verhältnis der durchschnittlichen monatlichen Wasserführungen am Pegel Füssen zu jener am Pegel Landsberg - vor Bau des Speichers - weist eine wesentlich größere Schwankung auf als das Verhältnis von Abgabemenge aus dem Speicher zu Durchflußmenge beim Pegel Landsberg. Daß die Werte des Pegels Füssen mit denen des Zuflusses zum Lechspeicher als Stichproben aus der gleichen Grundgesamtheit angesehen werden können, wurde anhand des parameterfreien Wilcoxon-Tests überprüft.

Die Überschreitungshäufigkeit der Monatsmittelwerte vor dem Bau des Speichers wird in Abb. 7 mit jener nach Bau des Speichers verglichen. Es ist deutlich zu sehen, daß die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von niederen wie hohen Abflußwerten merklich abnimmt.



Abb. 7

## 5. Korrelationsanalysen

Im folgenden werden stochastische Zusammenhänge zwischen den als zufällig angenommenen Variablen Zufluß, natürlicher Abfluß, Speichereinhalt und Abgabe untersucht.

Ebenso soll die Abhängigkeit des Abflusses wie der Abgabe innerhalb des Jahres zwischen den einzelnen Monaten am bestehenden System geklärt werden.

Ein Maß für die Stärke des stochastischen Zusammenhangs zwischen den Stichprobenwerten von Zufallsvariablen ist der Stichprobenkorrelationskoeffizient  $r$ , ein Schätzmaß des Korrelationskoeffizienten  $\rho$ .

$r = 0$  weist auf eine stochastische Unabhängigkeit hin

$r = \pm 1$  bedeutet, daß ein eindeutiger linearer funktionaler Zusammenhang zwischen den Variablen besteht.

Die Nullhypothese ( $\rho = 0$ ) wird zugunsten der Alternativhypothese ( $\rho \neq 0$ ) abgelehnt, wenn  $|r|$  den für die gewählte Irrtumswahrscheinlichkeit nach der Student-Verteilung errechneten Wert erreicht oder überschreitet.

### 5.1 Serienkorrelation von Zufluß und Abgabe

In Abb. 8 wird die wechselseitige Abhängigkeit aufeinanderfolgender Monate untersucht. Der entsprechende Korrelationskoeffizient wird als Quotient aus Kovarianz und Einzelstandardabweichung berechnet. Es gilt

$$r = \frac{s_{x_i x_{i-1}}}{s_{x_i} s_{x_{i-1}}}$$

mit

$$s_{x_i x_{i-1}} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i) (x_{i-1,k} - \bar{x}_{i-1})$$

$$s_{x_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2}$$

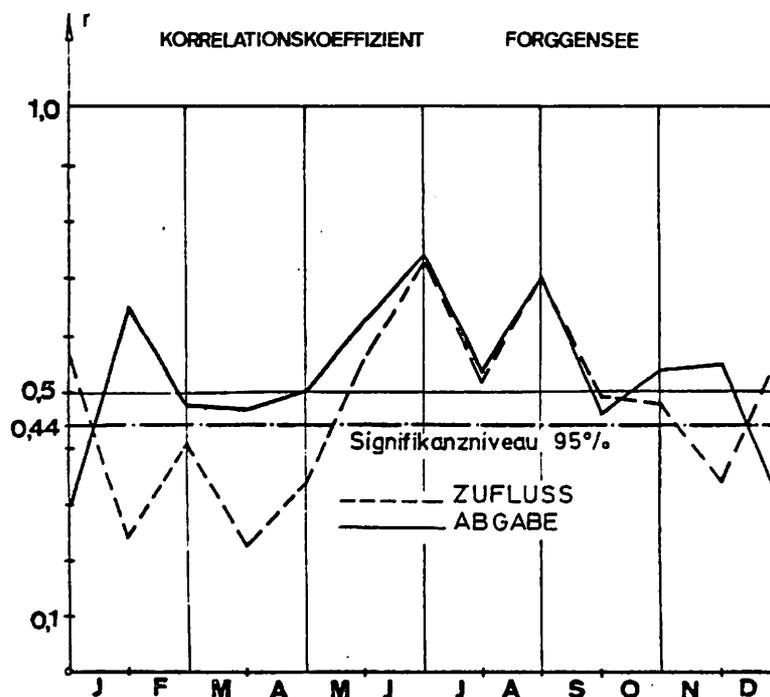


Abb. 8

Die Korrelation zwischen benachbarten Monaten der jeweiligen mittleren Zufluß- bzw. Abgabewerte wurde errechnet. Die wesentlich stärkere Bindung der monatlichen Abgabewerte zueinander gegenüber jener der Zuflüsse ist deutlich abzulesen.

## 5.2 Abgabenabhängigkeiten

Bei diesen Untersuchungen erwies sich das in Abschnitt 3.2 erläuterte Modell auch für das bestehende System besonders gut geeignet (Abb. 9).

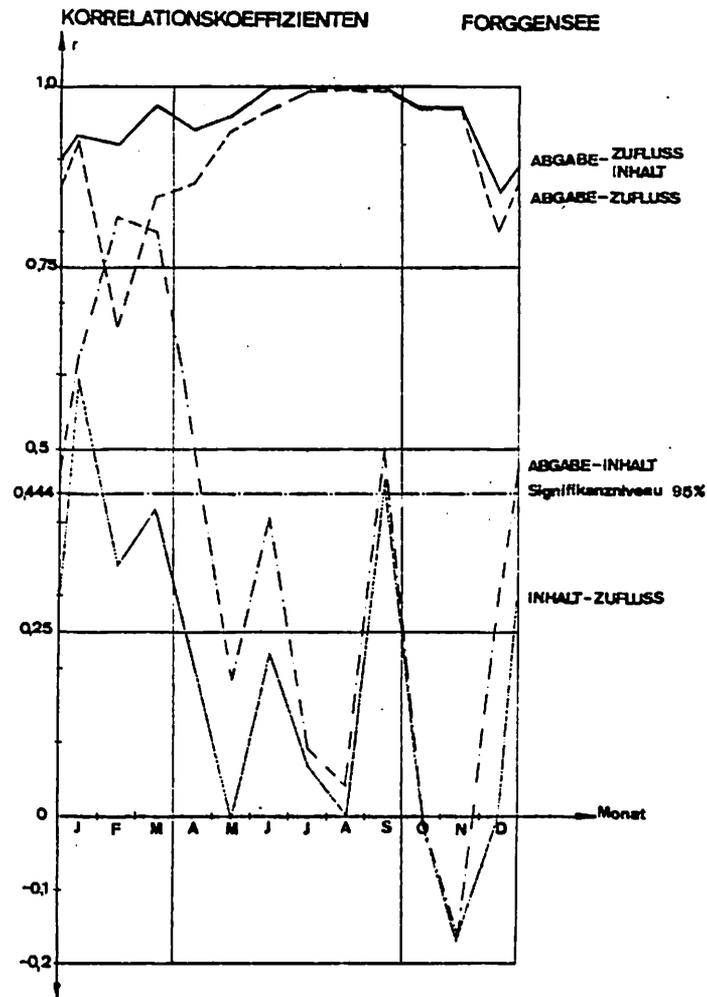


Abb. 9

Die Formeln sind analog Abschnitt 5.1 anzuwenden. Die Kurve, die die Zielgröße Abgabe  $A(t)$  von den Einflußgrößen Zufluß  $Z(t)$  und Inhalt  $S(t)$  mißt, wurde mittels des multiplen Korrelationskoeffizienten  $R_{A(t).Z(t) S(t)}$  der eine Mehrfachkorrelation berücksichtigt, berechnet:

$$R_{A(t).Z(t) S(t)} = \sqrt{\frac{r_{A(t) Z(t)}^2 + r_{A(t) S(t)}^2 - 2 \cdot r_{A(t) Z(t)} r_{A(t) S(t)} r_{Z(t) S(t)}}{1 - r_{Z(t) S(t)}^2}}$$

Damit wurde das beste Ergebnis erzielt.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen kann gefolgert werden, daß Modelle, die von einer Zufluß - Inhalts abhängigen Abgaberegeln ausgehen, einem Ansatz mit einer Steuerung der Abgabe in Abhängigkeit von Inhalt oder Zufluß überlegen sind.

Der Bayerischen Wasserkraftwerke AG danken wir für die freundliche Bereitstellung des den Untersuchungen zugrundeliegenden Datenmaterials.

Literaturangaben:

- Beard, L.R.           Simulation of daily streamflow.  
Int.Hydrology Symposium, Fort Collins 1967.
- Franke, P.-G. und    On a reservoir with a release depending on inflow and content.  
Leipold, Th.        Proc. Conference on Improvements in Planning of Water Management, Bd. 2A,  
S.19.1 - 19.13, Budapest 1973.
- Sachs, L.            Angewandte Statistik.  
Springer, Berlin 1973
- Der Lech und der Lechausbau.  
Bayerische Wasserkraftwerke AG, München 1974.

MATHEMATISCHES MODELL ZUR VORHERSAGE DES ABFLUSSGESCHEHENS IN DER BAYERISCHEN DONAU NACH DEM  
AUSBAU MIT STAUSTUFEN

G. Rös1

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТОКА НА БАВАРСКОМ ОТРЕЗКЕ ДУНАЯ  
ПОСЛЕ СООРУЖЕНИЯ ПОДПОРНЫХ СТУПЕНЕЙ

Г. Ресль

Zusammenfassung:

Zur Vorhersage des Abflußgeschehens in der bayerischen Donau nach dem Staustufenausbau wird ein mathematisches Modell aufgestellt. Es basiert auf der Lösung der St. Venant'schen Differentialgleichungen mit einem impliziten Lösungsalgorithmus.

Vor der Berechnung der Systemzustände für den geplanten Staustufenausbau wird das Modell für den bestehenden Zustand mittels Naturmessungen überprüft.

Резюме:

Для прогнозирования явления стока для баварского Дуная после ступенчатого запружения составляется математическая модель. Она базируется на решении дифференциальных уравнений Ст. Венанта с включенным в него алгоритмом решения.

Перед расчетом состояний системы для запланированного ступенчатого запружения воды модель проверяется для существующего состояния посредством измерений в естественных условиях.

1. Einleitung

Der Mensch greift in zunehmendem Maße in die hydrologischen Abläufe seines Lebensraumes ein. Bis vor wenigen Jahren wurde den quantitativen und qualitativen Auswirkungen dieser irreversiblen Eingriffe wenig Beachtung geschenkt. Erst in neuerer Zeit ist man dazu übergegangen sie genauer zu analysieren - sie zu berechnen, vorherzusagen und in letzter Konsequenz zu steuern. Die Wissenschaft bedient sich dazu zunehmend der mathematischen Modelle, die die vorhandenen Kenntnisse der komplizierten komplexen physikalischen Prozesse mit den neuesten Methoden der angewandten Mathematik und der elektronischen Datenverarbeitung vereinigen.

Gerade auf dem Gebiet der Hydrologie wurden in den letzten Jahren beachtliche Erfolge mit diesen Modellen erzielt. In diesem Beitrag wird ein mathematisches Modell vorgestellt, das dazu verwendet werden kann, die quantitativen Auswirkungen anthropogener Eingriffe auf das Abflußgeschehen eines Flußsystems zu berechnen und damit langfristige Vorhersagen zu treffen.

2. Problemstellung

Im Zuge des Ausbaues der Bayerischen Donau zur Großschiffahrtsstraße werden auf der Strecke von Kelheim bis Passau sieben Staustufen errichtet (Abb. 1).

Ihre primäre Funktion besteht darin, bei Niedrigwasser eine ausreichende Wassertiefe für die Schifffahrt zu gewährleisten. Die geplanten Baumaßnahmen,

- a) Veränderung der Fließquerschnitte durch Eindeichungen bzw. Abgrabungen und damit Veränderung des Retentionsraumes
- b) Bau der Staustufen und aller damit zusammenhängender Bauten

haben für das gegenwärtige Flußregime der Donau mit ihren wichtigsten Nebenflüssen Altmühl, Naab, Regen,

Isar und Vils gravierende irreversible Konsequenzen. Das Zentralproblem ist die Veränderung der charakteristischen Eigenschaften des Hochwasserwellenablaufes wie Anstiegsintensität, Beschleunigung und Größe des Scheitelwertes durch den Staustufenausbau.

Eine Vorhersage des zukünftig zu erwartenden Abflußgeschehens ist unumgänglich, da eine ungünstige Beeinflussung obiger Eigenschaften eine Verschärfung der Hochwassersituation für die Unterliegerstaaten haben kann.

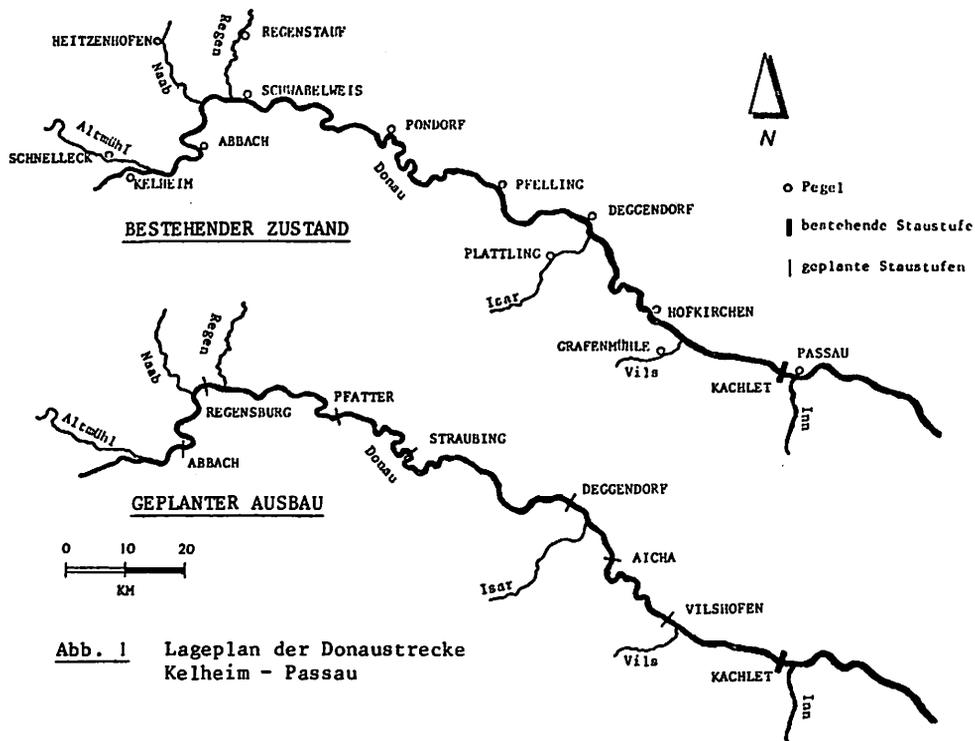


Abb. 1 Lageplan der Donaustrecke Kelheim - Passau

### 3. Mathematisches Modell

Im Jahre 1963 wurde an der Versuchsanstalt für Wasserbau der Technischen Universität München begonnen, ein physikalisches Flußmodell zu erstellen, um die anstehenden Probleme zu behandeln. Für die Flußstrecke von Schwabelweis bis Straubing (ca. 60 km) wurde ein höhenverzerrtes Modell mit einer Länge von 600 m errichtet.

Heute ist der Aufwand an Zeit und Kosten, der dazu notwendig war, nicht mehr gerechtfertigt, da man in der Zwischenzeit in der Lage ist, derartige Aufgaben mit Hilfe eines mathematischen Modelles wesentlich schneller und billiger zu beantworten. Sollen jedoch Detailprobleme, wie z.B. Strömungsvorgänge in Poldergebieten behandelt werden, so ist man auch heute noch auf das physikalische Modell angewiesen.

Bei der Konzeption des mathematischen Modelles lassen sich im wesentlichen vier Phasen unterscheiden, die zeitlich teils nebeneinander, teils hintereinander ablaufen.

Dies sind,

Phase 1: Formulierung der physikalischen Prozesse in Form von partiellen Differentialgleichungen und Entwicklung eines Algorithmus zu deren numerischen Lösung.

- Phase 2: Konstruktion eines Modelles, das das gegenwärtige Abflußgeschehen so gut simuliert, daß es dazu verwendet werden kann, alternative Stauzustände mit guter Wahrscheinlichkeit vorherzusagen.
- Phase 3: Einbau der geplanten Änderungen in das mathematische Flußmodell und Berechnung der neuen Systemzustände.
- Phase 4: Vergleich der Systemzustände vor dem Ausbau des Flusses mit denen nach dem Ausbau und Beurteilung der berechneten Auswirkungen.

### 3.1 St. Venant'sche Differentialgleichung und deren Lösung

Die physikalischen Prozesse, die sich beim Ablauf einer Hochwasserwelle in einem Gerinne abspielen, werden durch die St. Venant'schen Differentialgleichungen beschrieben.

Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B_s \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = q$$

Energiegleichung:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + (g \cdot F \cdot \frac{Q^2}{F^2} \cdot B) \cdot \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{2 \cdot Q \cdot B_s}{F} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} + g \cdot J_R \cdot F = \frac{Q^2 \cdot B}{F^2} \cdot J_s + q \cdot v_s \cdot \cos \phi$$

$$J_R = \frac{Q^2}{F^2 \cdot K_s^2 \cdot R^4 / s}$$

Diese Gleichungen sind nur unter Voraussetzung folgender Annahmen gültig:

- die Bewegung der Hochwasserwelle ist eindimensional;
- als Strömungsgeschwindigkeit wird die mittlere Fließgeschwindigkeit eingesetzt;
- zeitliche und örtliche Veränderungen des Flußgerinnes werden vernachlässigt;
- die Reibungsverluste werden mit einem stationären Ansatz berechnet.

Diese Bedingungen treffen für Hochwasserabläufe in natürlichen Gerinnen weitgehend zu.

Die St. Venant'schen Gleichungen bilden ein quasilineares partielles Differentialgleichungssystem hyperbolischen Typs, für das keine analytische Lösung existiert. Näherungslösungen können unter Anwendung expliziter und impliziter Differenzverfahren angegeben werden. Bei diesen Methoden wird die Lösung der Gleichungen nur an diskreten Punkten  $j \cdot \Delta x$ ,  $i \cdot \Delta t$  der Weg-Zeit-Ebene berechnet.

Aus Gründen der Rechenstabilität muß bei den expliziten Verfahren zwischen dem Wegschritt  $\Delta x$  und dem Zeitschritt  $\Delta t$  die Bedingung

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \leq v + \sqrt{g \cdot \frac{F}{R}}$$

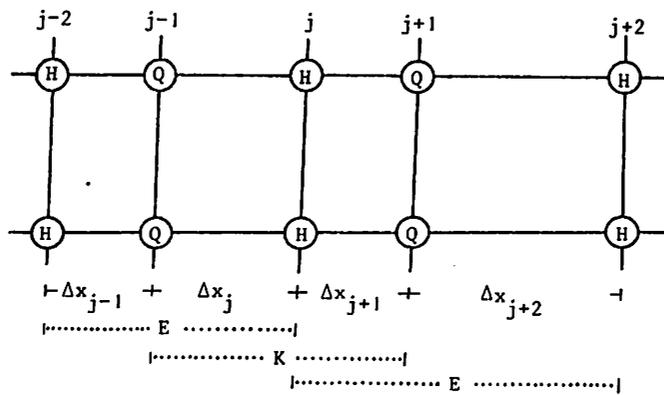
erfüllt sein. Dies bedingt die Verwendung eines sehr kleinen Zeitschrittes  $\Delta t$ .

Bei der Donau ergibt sich für den  $\Delta x = 1.0 \text{ km}$  ein  $\Delta t = 90 \text{ s}$ . Aus rechentechnischen Gründen muß außerdem mit einem konstanten Wegschritt für das gesamte Flußsystem gerechnet werden. Für die Berechnung einer Hochwasserwelle von einer Dauer von 30 Tagen für die Strecke von Kelheim bis Passau, ergeben sich unter Zugrundelegung von  $\Delta x = 1.0 \text{ km}$  und  $\Delta t = 90 \text{ s}$   $5,5 \cdot 10^6$  Computerzyklen. Die impliziten Verfahren dagegen lassen

die Verwendung eines variablen Wegschrittes zu. Außerdem sind sie hinsichtlich des Zeitschrittes unbegrenzt stabil. Eine obere Schranke wird nur durch die geforderte Genauigkeit gesetzt. In praktischen Berechnungen können jedoch nichtlineare Instabilitäten auftreten, die meist durch plötzliche Änderungen von Parametern initiiert werden.

Eine wesentliche Forderung an das mathematische Modell ist seine Flexibilität und ein geringer Bedarf an Rechenzeit. Diese Faktoren sprechen für die Verwendung eines impliziten Differenzverfahrens. Es arbeitet mit Wegschritten von maximal 6,0 Km und minimal 0,9 Km mit Zeitschritten von maximal 12,0 h. Im Vergleich zu den expliziten Verfahren ergeben sich bei einem Zeitschritt von 1h ca.  $5,0 \cdot 10^4$  Computerzyklen.

Dem impliziten Lösungsalgorithmus liegt das in Abb. 2 dargestellte Differenzengitter zugrunde. Entlang der Nebenflüsse und des Hauptflusses wird alternierend der Wasserstand H bzw. der Abfluß Q berechnet.



E: Energiegleichung  
 K: Kontinuitätsgleichung

Abb. 2 Diskretisierungsschema

Durch abwechselnden Ansatz der Energiegleichung (Gitterelement H-Q-H) bzw. der Kontinuitätsgleichung (Gitterelement Q-H-Q) läßt sich ein algebraisches Gleichungssystem folgender Form aufbauen:

$$a_j \cdot Z_{j+1}^{i+1} + b_j \cdot Z_j^{i+1} + c_j \cdot Z_{j-1}^{i+1} = d_j$$

In dieser Gleichung steht  $Z_j$  für  $H_j^{i+1}$  bzw.  $Q_j^{i+1}$  abhängig davon, an welcher Stelle man sich im Differenzengitter befindet. Die Koeffizienten  $a_j$ ,  $b_j$ ,  $c_j$  und  $d_j$  sind Funktionen von  $Z_{j+1}^{i+1}$ ,  $Z_j^{i+1}$ ,  $Z_{j-1}^{i+1}$  und  $Z_j^i$ ,  $Z_{j-1}^i$ ,  $Z_{j+1}^i$ , d.h. die Gleichungen sind nichtlinear.

Zusammen mit den gegebenen Randbedingungen ergibt sich ein Gleichungssystem, dessen Matrix bandförmig aufgebaut ist. Wegen der Nichtlinearität muß die Lösung iterativ erfolgen. In der Regel genügen zwei Iterationszyklen.

### 3.2 Simulation des gegenwärtigen Zustandes

Zu einem lauffähigen Simulationsmodell gehört ein Satz von Parameterfunktionen, die das Flußsystem charakterisieren. Es lassen sich drei Gruppen unterscheiden: Geometrie, Rauigkeit, Hydrologie.

Um die Flexibilität des Modelles zu bewahren, muß der Umfang der Parameter auf ein Minimum beschränkt wer-

den. Dies macht eine Komprimierung der Information aus den Rohdaten notwendig. Die Aufbereitung und Verarbeitung der Daten (data processing) wird vom Computer mittels Unterprogrammen durchgeführt. Was jedoch fehlt, ist das Verbindungsglied zwischen den Naturmessungen und den Daten in computergerechter Form. Gerade dieser Punkt der Übertragung der Rohinformation auf einen Datenträger ist sehr arbeitsintensiv.

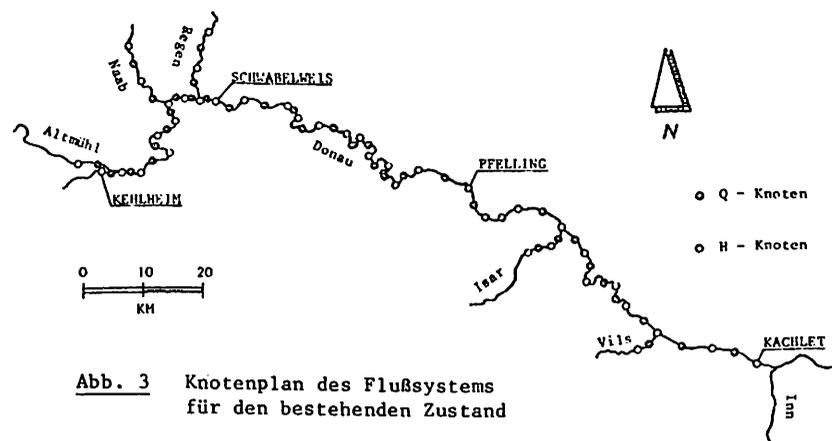
### 3.2.1 Knotenplan

Bei der Aufstellung des Knotenplanes, d.h. bei der Festlegung der Gitterpunkte entlang der Flußachse, an denen der Wasserstand  $H$  bzw. der Abfluß  $Q$  berechnet werden soll, sind sowohl physikalische als auch numerische und geometrische Gesichtspunkte zu beachten. Um all diese Aspekte kompatibel zu berücksichtigen, bedarf es eines guten "Engineering Judgements" des Bearbeiters.

Die  $H$ -Knoten werden grundsätzlich unmittelbar in die Pegelmeßstellen gelegt. Damit ist ein direkter Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Werten möglich. Eventuell vorhandene Zwangspunkte, wie Einmündungen von Nebenflüssen, starke Querschnittsänderungen und sonstige Unstetigkeitsstellen sind vorrangig zu berücksichtigen. Die Lage der  $Q$ -Knoten wird von numerischen Gesichtspunkten bestimmt. Sie werden so eingepaßt, daß die Quotienten

$$U_j = \frac{|\Delta x_j - \Delta x_{j+1}|}{\Delta x_j + \Delta x_{j+1}}$$

einem Minimum zustreben. Weichen aufeinanderfolgende  $\Delta x_j$ -Werte stark voneinander ab, so können numerische Schwierigkeiten auftreten. Für das Flußmodell der Donau wurde der in Abb. 3 dargestellte Knotenplan verwendet.



Besondere Verhältnisse liegen im Stadtbereich von Regensburg vor. Hier treten Verzweigungen und Zusammenflüsse infolge der Teilung der Donau in Süd- und Nordarm mit ihrer Querverbindung zwischen den beiden Inseln Obere und Untere Wöhrd auf. Zusätzlich mündet hier der Nebenfluß Regen in die Donau ein (Abb. 4). Sollen in diesem Gebiet detaillierte Aussagen gemacht werden, so muß das Knotennetz stark verdichtet werden (Abb. 4).

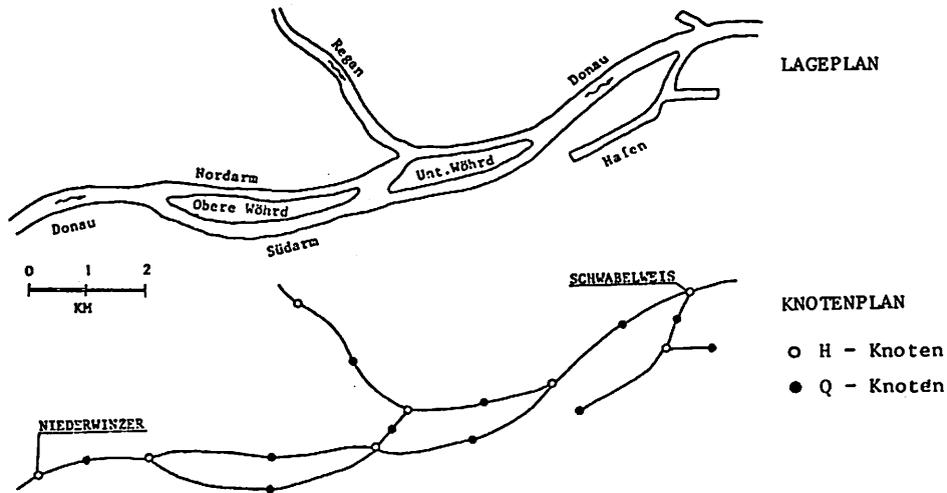


Abb. 4 Detailplan im Bereich der Stadt Regensburg

Es ist jedoch nicht zweckmäßig, bei der Berechnung des gesamten Flußsystems diese Details einzuarbeiten, denn sie verlängern nur die Rechenzeiten, haben aber keinerlei Auswirkung auf die Genauigkeit der gewünschten Ergebnisse.

3.2.2 Modellparameter

Geometrie

Zur vollständigen Beschreibung der Gerinnegeometrie werden die folgenden vier Funktionen benötigt:

$F = F(H,x)$	Fläche
$B = B(H,x)$	Breite
$B_s = B_s(H,x)$	Speicherbreite
$R = R(H,x)$	Hydr. Radius

Sie werden aus Querprofilaufnahmen und Lageplänen ermittelt. Ausgehend von einem Bezugshorizont, der gleichzeitig die Information über das Sohlgefälle beinhaltet, werden in einem festen Abstand die Funktionswerte berechnet. Die Funktionen mittels Polynomen zu approximieren ist wegen der sich sehr stark ändernden Verhältnisse im Übergangsbereich vom Flußschlauch zu den Vorländern nicht möglich.

Rauhigkeit

Die Gerinnerauhigkeit des Flußsystems wird durch den Rauigkeitsbeiwert nach Strickler ausgedrückt. Dieser wird aus stationären Wasserspiegelfixierungen und den dazugehörigen Abflüssen berechnet. Diese Annahme ist bei langsamen instationären Vorgängen - solche liegen beim Ablauf der Hochwasserwellen vor - durchaus gerechtfertigt. Diese Werte beinhalten auch andere Effekte wie Krümmungseinflüsse, örtliche Verluste usw.

Hydrologie

Das Flußsystem wird bei der Behandlung im mathematischen Modell aus seiner Umgebung herausgetrennt. An den

Schnittstellen sind Zuflüsse von außen vorhanden. Es sind dies Zuflüsse aus Zwischenniederschlagsgebieten und Nebenflüssen. Diese sind in Form von Wasserstands- bzw. Abflußganglinien gegeben.

### 3.2.3 Simulationsergebnisse

Mit diesen Daten kann das mathematische Modell gestartet werden. Einige Ergebnisse der Simulationsläufe sind in der Abb. 5, 6 und 7 dargestellt. Es kann nicht erwartet werden, daß die berechneten Werte exakt mit den gemessenen Werten übereinstimmen, denn durch die getroffenen Annahmen und Approximationen hat man sich mehr oder minder stark von der physikalischen Realität entfernt. Für die untersuchten Hochwasserereignisse sind die Abweichungen im Abfluß für den Pegel Schwabelweis in Tab. 1 dargestellt.

Ereignis	Mittl. Abweichung	Max. Abweichung
1940	3,2 %	6,0 %
1965	2,5 %	5,2 %
1970	2,3 %	4,3 %

Tab. 1: Abweichungen zwischen Rechnung und Messung

Treten örtlich größere Abweichungen auf, so lassen sich diese durch einen Eichprozeß reduzieren. Der am besten geeignete Eichparameter ist der Rauigkeitsbeiwert. Dieser Vorgang entspricht in etwa der Eichung eines physikalischen Modells.

Die ausgezeichneten Simulationsergebnisse für den gegenwärtigen Zustand des Flußsystems lassen erwarten, daß auch für die Systemzustände nach dem Ausbau mit Staustufen gute Aussagen gemacht werden können.

### 3.3 Einbau der Änderungen für den gestauten Zustand

Auf der Strecke von Kelheim bis Passau werden sieben Staustufen errichtet. Ihre Lage am Fluß sowie die Art ihrer Steuerung ist in Tab. 2 enthalten.

Name	Lage Fluß - Km	Hydr. Stau m ü. NN	Steuerung
Abbach	2 401.550	338,20	H=H (Q)
Regensburg	2 381.120	332,50	H=H (Q)
Pfatter	2 352.535	327,30	H=konstant
Straubing	2 328.687	320,00	H=konstant
Deggendorf	2 286.150	313,00	H=H (Q)
Aicha	2 272.500	309,00	H=H (Q)
Vilshofen	2 251.500	303,20	H=H (Q)
Kachlet	2 230.700	299,80	H=konstant

Tab. 2: Geplante Staustufen

Für den Stauzustand ist der Knotenplan dahingehend abzuändern, daß direkt an den Staustellen H-Knoten zu liegen kommen. Dies bedingt eine geringfügige Änderung der Lage der Nachbarknoten.

Durch Abgrabungen und Eindeichungen wird die Gerinnegeometrie geändert. Wesentliche Eingriffe in die Flußtopologie werden nur in den Stauräumen Pfatter und Straubing vorgenommen. Bei den anderen Staustufen beschränken sie sich auf den unmittelbaren Wehrbereich. Die Gerinnegeometrie wird für das gesamte Flußsystem neu berechnet.

PESEL, SCHWABELWEIS

HOCHWASSER 1940

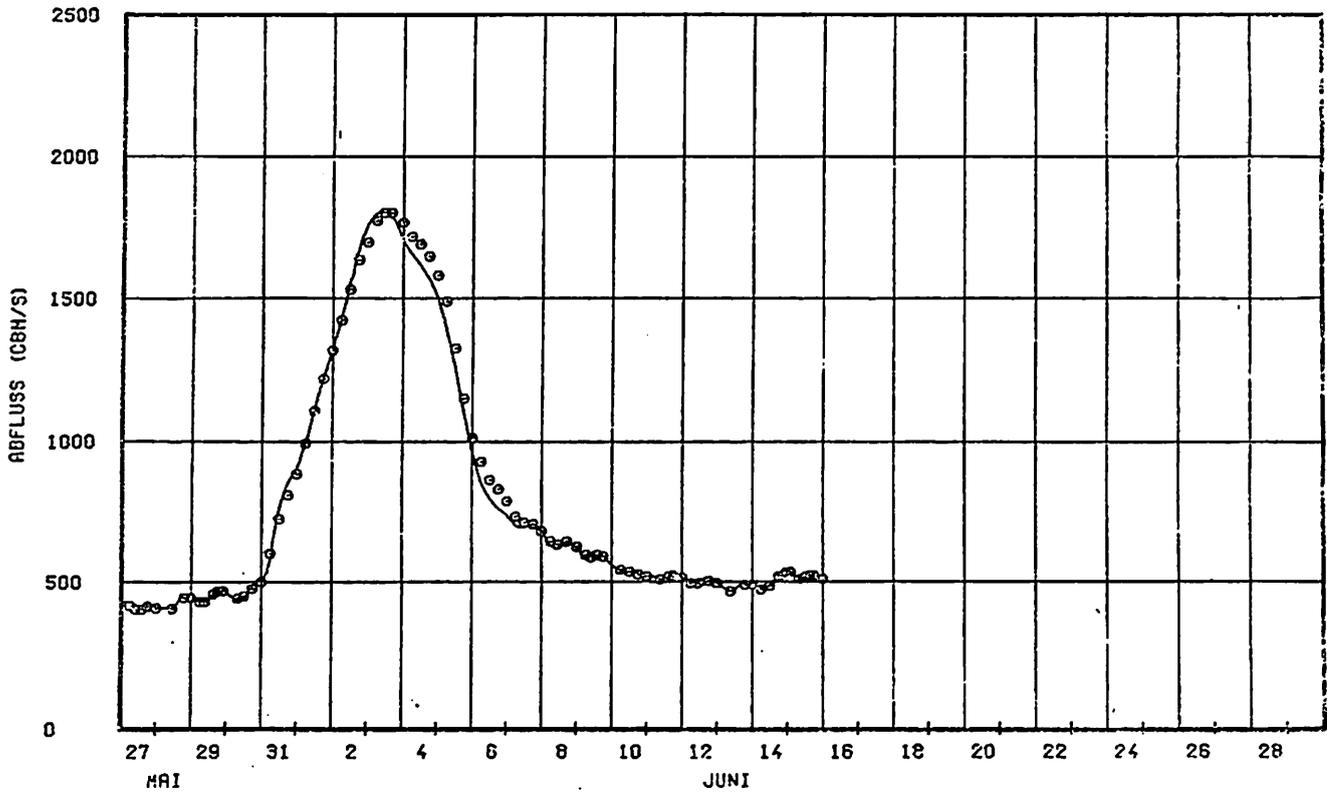


Abb. 5: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Werten für den bestehenden Zustand

o      MESSUNG  
 —      RECHNUNG

PESEL, SCHWABELWEIS

HOCHWASSER 1965

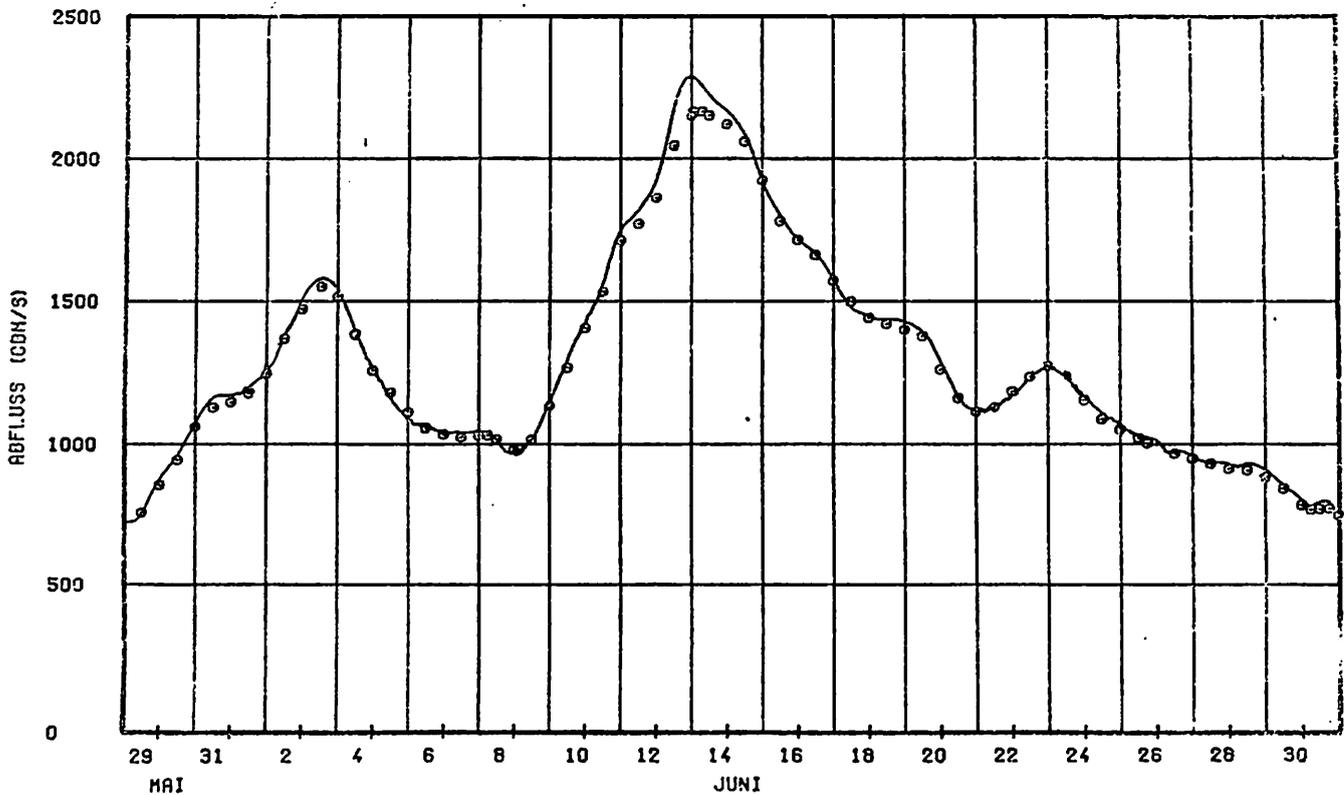


Abb. 6: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Werten für den bestehenden Zustand

o      MESSUNG  
 —      RECHNUNG

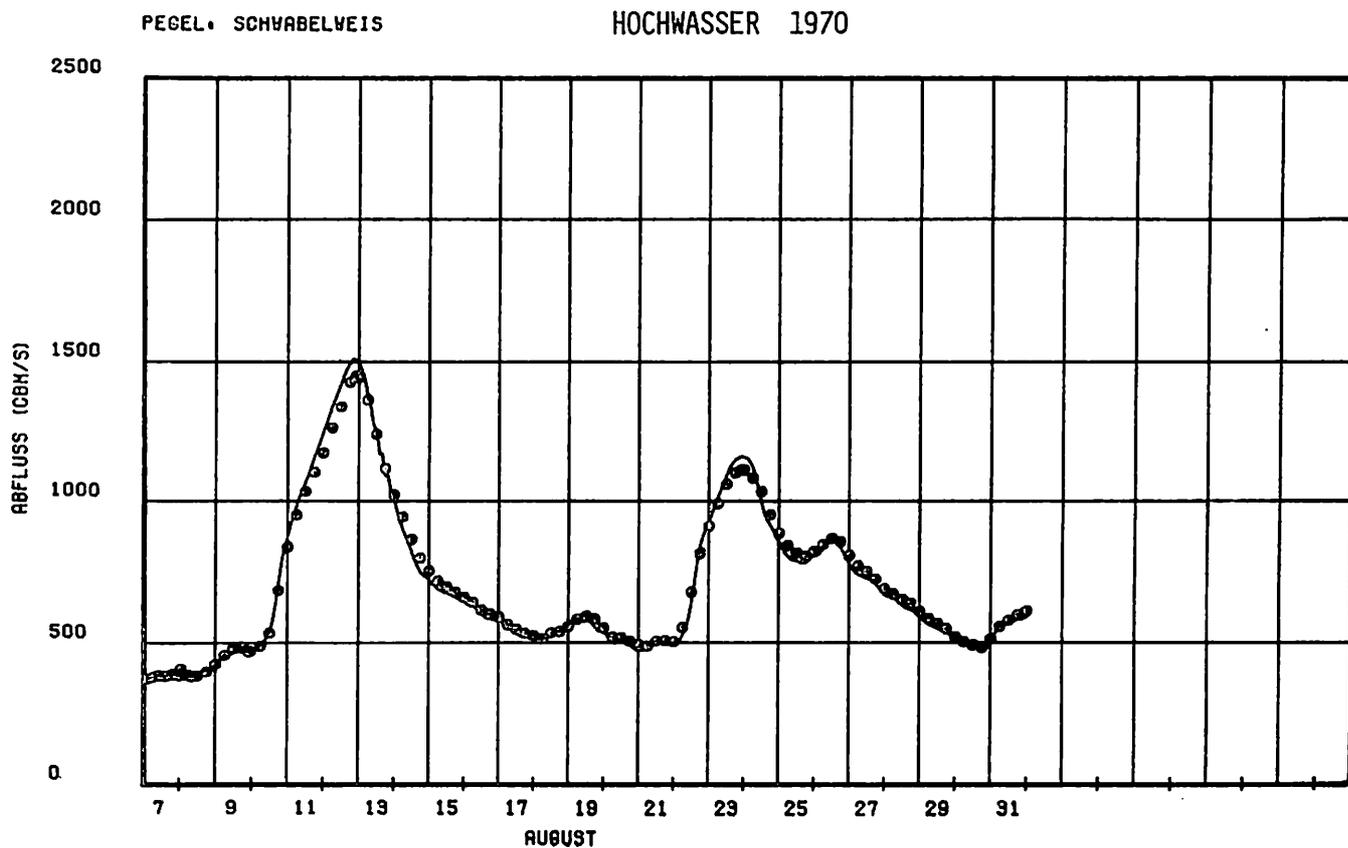


Abb. 7: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Werten für den bestehenden Zustand

○           MESSUNG  
 —         RECHNUNG

Die Rauigkeitsbeiwerte werden vom jetzigen Zustand übernommen. Diese Annahme muß gemacht werden, da eine Neuberechnung aus Wasserspiegelfixierungen nicht möglich ist.

Vergleichende Untersuchungen für die Rauigkeitsbeiwerte vor und nach dem Staustufenausbau wurden an der österreichischen Donau durchgeführt. Dort konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die getroffene Annahme ist damit durchaus gerechtfertigt.

Mit den geänderten Parameterfunktionen und dem Einbau der Staustufen mit ihren Wehrsteuerungen in das mathematische Modell wird der gestaute Zustand simuliert.

#### 3.4 Vergleich der Systemzustände vor und nach dem Ausbau

Teilergebnisse zeigen die Abb. 8, 9 und 10. Es sind jeweils die berechneten Wasserstands- bzw. Abflußganglinien für den ungestauten und den gestauten Zustand gegenübergestellt. Bemerkenswert ist eine deutliche Beschleunigung der Hochwasserwelle für den Stauzustand. Die zeitliche Verschiebung der Hochwasserspitzen beträgt am Pegel Schwabelweis durchschnittlich 4 Stunden, am Pegel Pfelling durchschnittlich 12 Stunden. Die Beschleunigung ist damit zu erklären, daß einmal durch den Aufstau die Welle auf einen vollen Stauraum trifft (der im ungestauten Zustand vorhandene Retentionsraum steht nicht mehr im vollen Umfang zur Verfügung) und zum anderen die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit im Stauraum infolge einer größeren Wassertiefe zunimmt.

Eine signifikante Formänderung bei den Abflußganglinien ist nicht feststellbar.

# HÖCHWASSER 1940

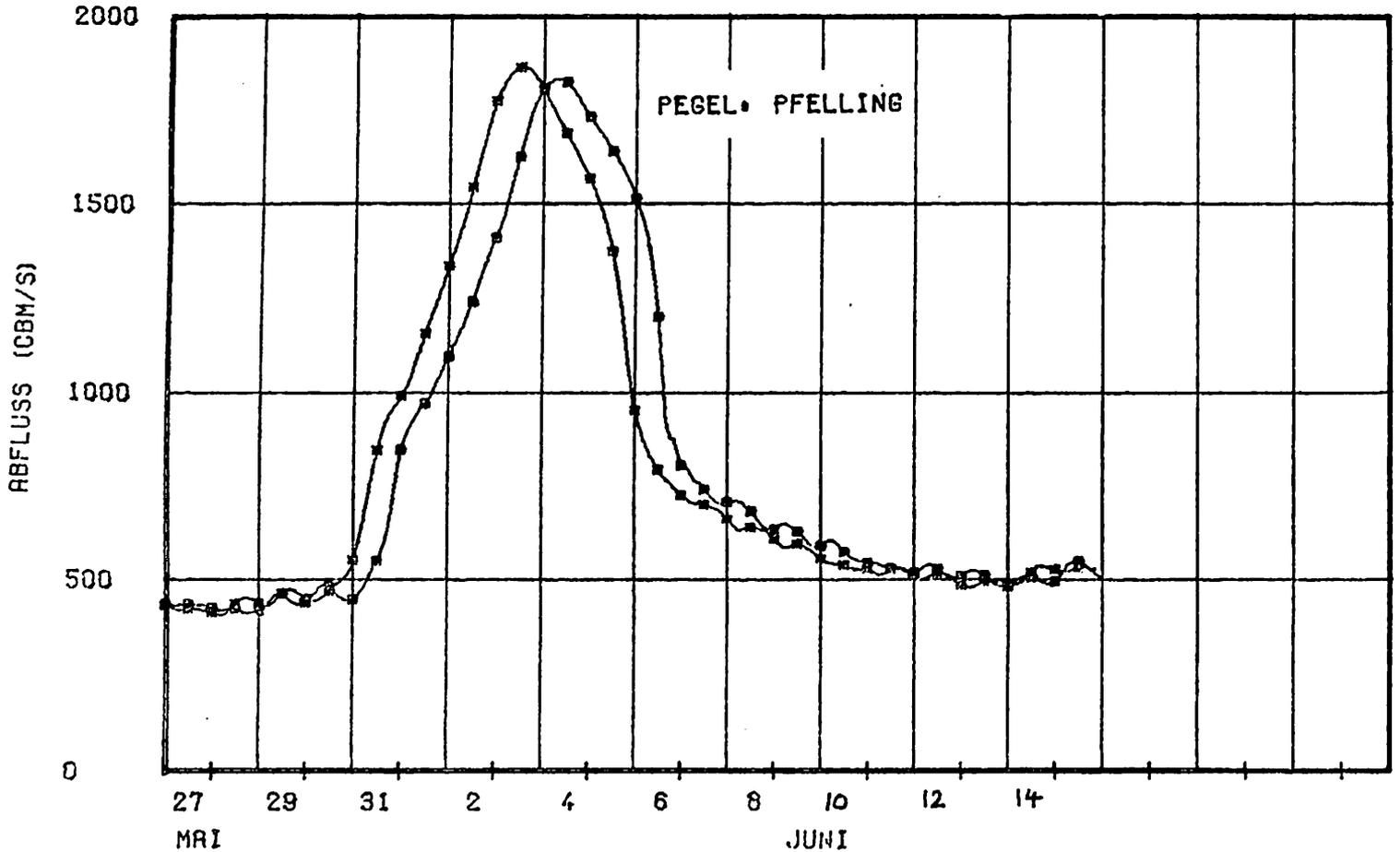
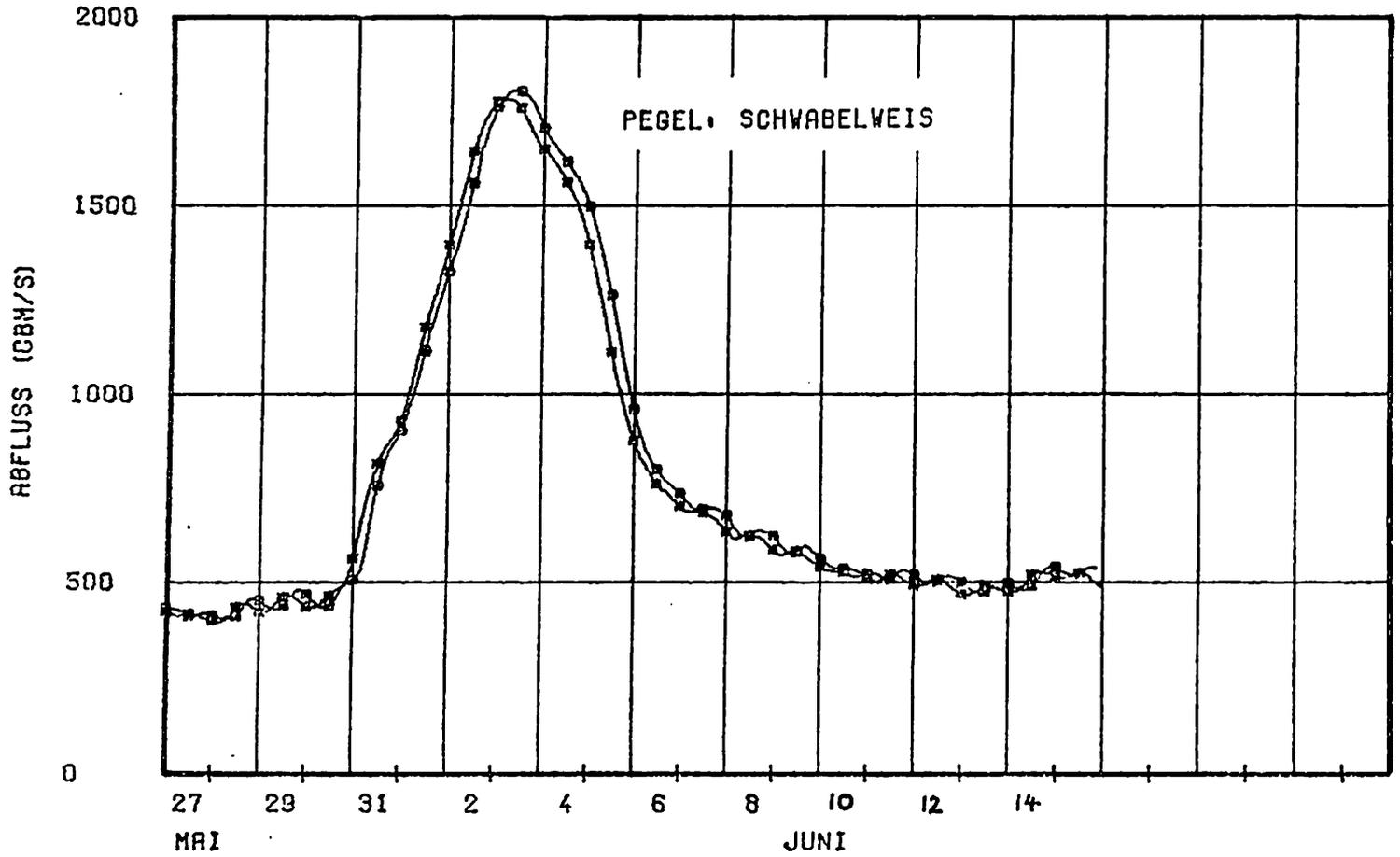


Abb. 8: Vergleich zwischen Rechnung ungestaut und Rechnung gestaut

- RECHNUNG UNGESTAUT
- \* RECHNUNG GESTAUT

# HÖCHWASSER 1970

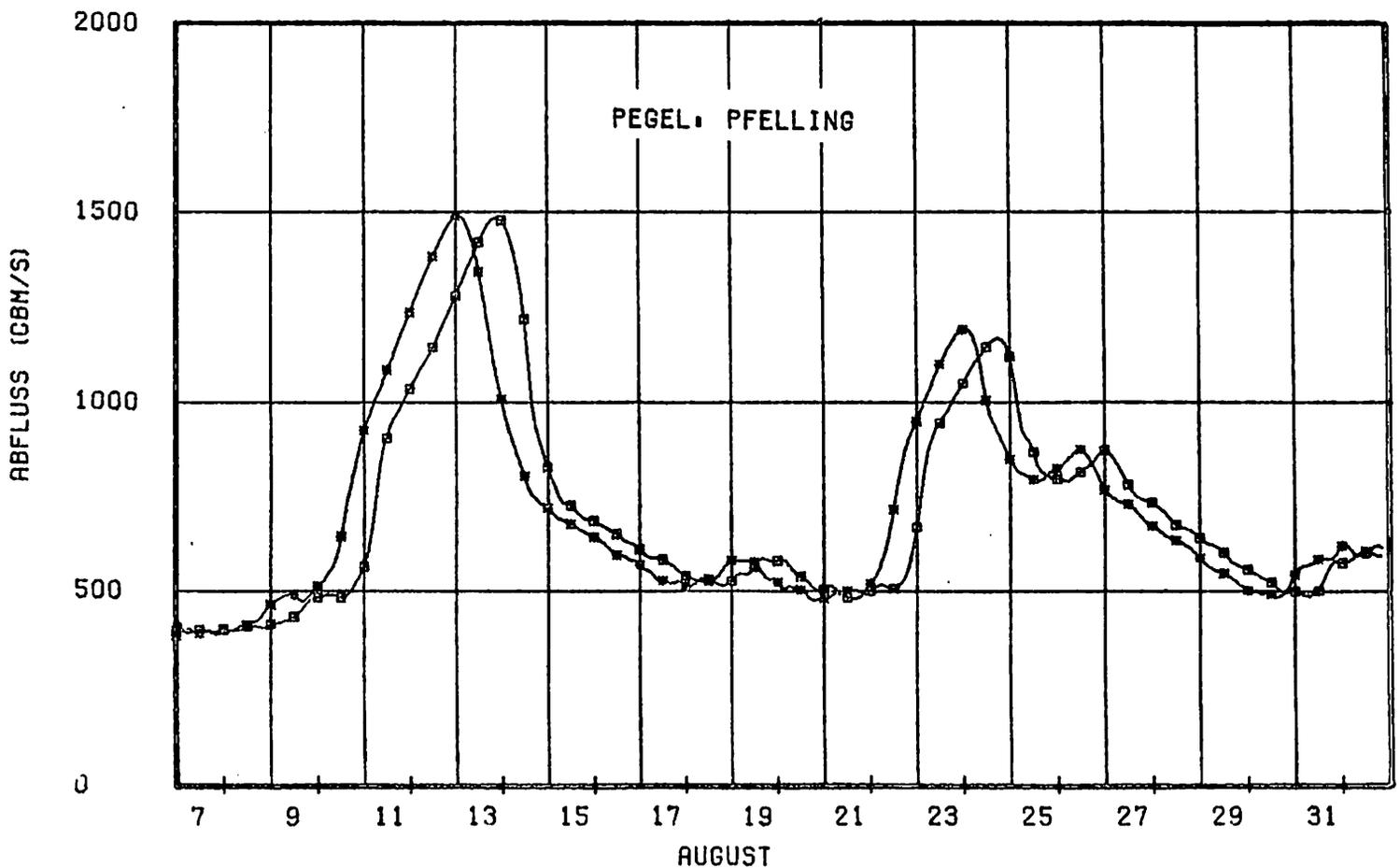
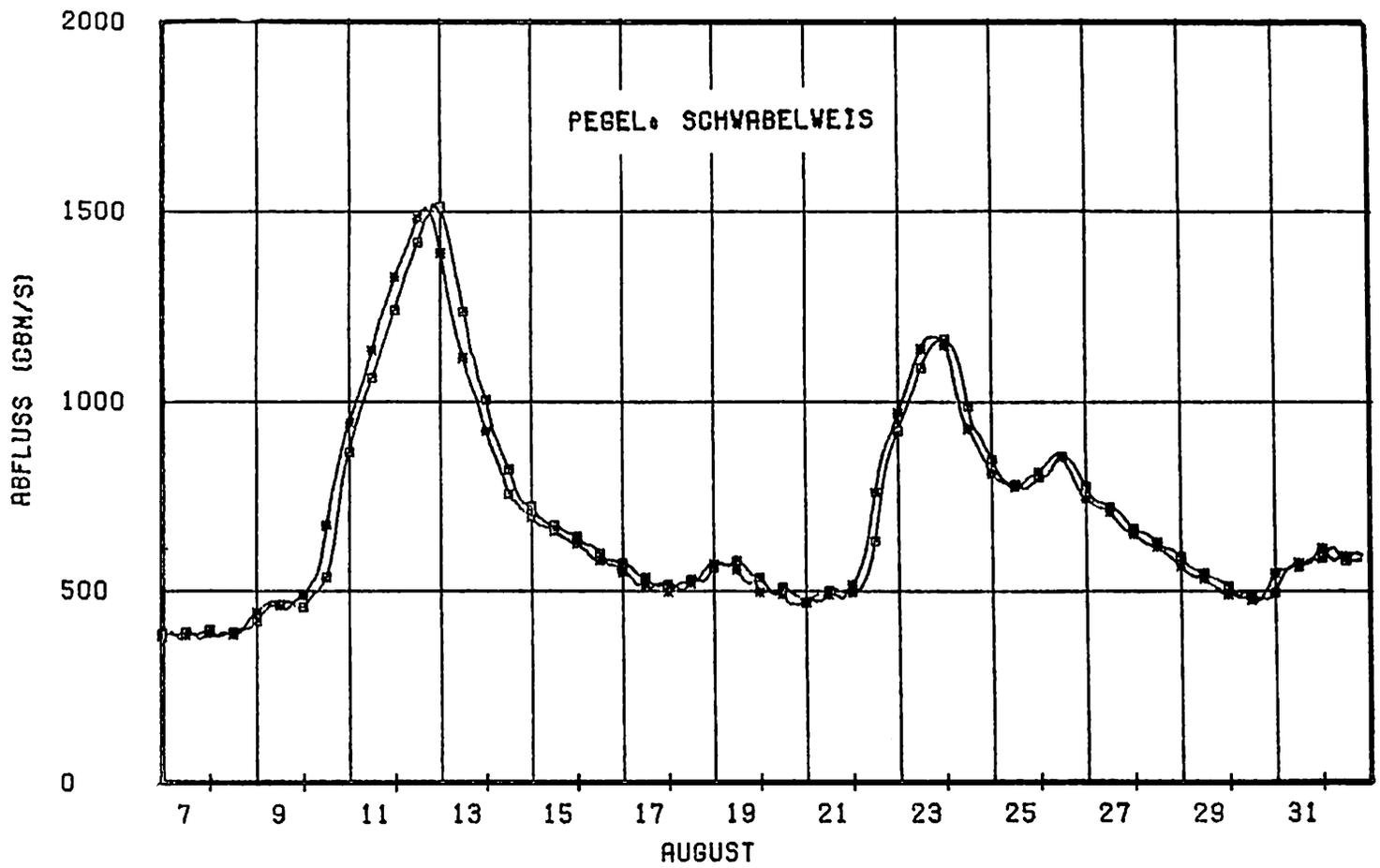


Abb. 9: Vergleich zwischen Rechnung ungestaut und Rechnung gestaut

□ RECHNUNG UNGESTAUT

\* RECHNUNG GESTAUT

# HÖCHWASSER 1970

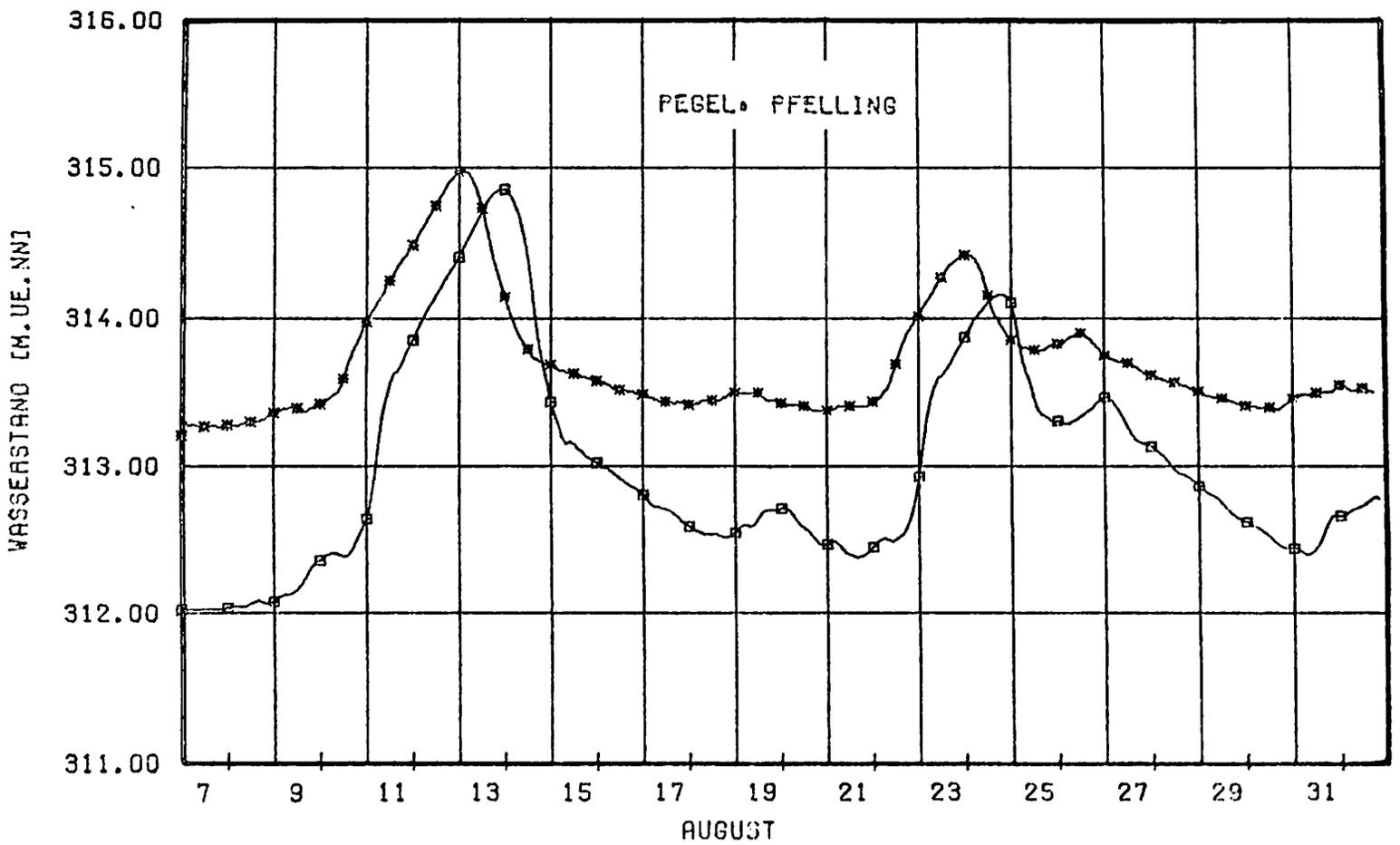
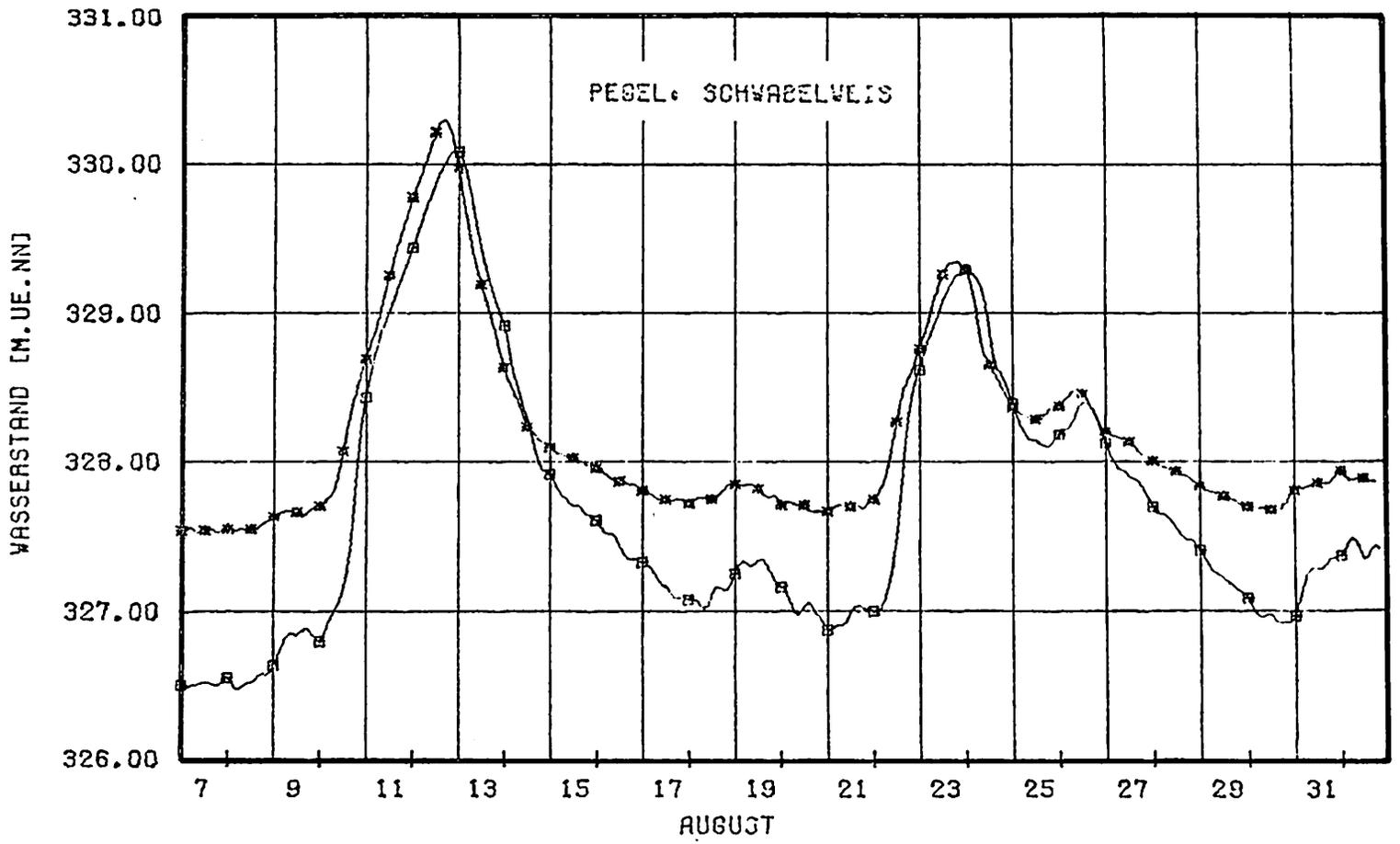


Abb. 10: Vergleich zwischen Rechnung ungestaut und Rechnung gestaut

- RECHNUNG UNGESTAUT
- \* RECHNUNG GESTAUT

#### 4. Schlußbemerkungen und Ausblick

Die Ergebnisse verdeutlichen, welche Möglichkeiten dem planenden Ingenieur mit dem mathematischen Modell in die Hand gegeben sind. Das Modell liefert nicht nur langfristige Vorhersagen für das Abflußgeschehen. Es kann ebenso bei der Planung direkt eingesetzt werden, um örtliche Veränderungen des Hochwasserwellenablaufes infolge von Baumaßnahmen zu berechnen. Das Modell ist so flexibel aufgebaut, daß es innerhalb sehr kurzer Zeit mit geänderten Modellparametern gestartet werden kann.

Die dargestellten Ergebnisse sind Teil eines Auftrages, der vom Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft der TU München für die Rhein-Main-Donau AG bearbeitet wird. Alle Computerberechnungen wurden am Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften an einem TR440-Computer durchgeführt.

#### L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s :

1. Dorer, H. Berechnung des nichtstationären Abflusses in nichtprismatischen offenen Gerinnen.  
Sonderdruck aus: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 31, Karlsruhe, März 1972.  
- Diese Veröffentlichung enthält eine umfangreiche Literatursammlung -
2. Hartung, F. Hydraulische und mathematische Modelle an Flüssen.  
Wasserwirtschaft, 60. Jg., H. 1/2, 1970.
3. Hartung F.  
Rösl, G. Jahresbericht an die Deutsche Forschungsgemeinschaft.  
München, März 1974 (unveröffentlicht)
4. Urban, A. Fließbeiwerte und Rauigkeiten der Kraftwerksstauräume der österreichischen Donau.  
Österreichische Wasserwirtschaft, 25. Jg., H. 7/8, S. 145, Juli/August 1973.
5. Verwey, A. Mathematical Model for Flow in Rivers with Realistic Bed Configuration.  
International Courses in Hydraulic and Sanitary Engineering. Report Series No. 12.
6. Vreugdenhil, C.B. Hydraulic Research for Water Management.  
Committee for Hydraulic Research TNO.  
Proceedings of Technical Meeting 26, The Hague 1973.
7. Zielke, W. Elektronische Berechnung von Rohr- und Gerinneströmungen.  
Erich Schmidt Verlag, 1974.

#### Liste der Bezeichnungen:

Q	Abfluß	$m^3/s$	$I_s$	Sohlgefälle	
H	Wasserstand	m.ü.NN	$I_R$	Reibungsgefälle	
F	Fließquerschnitt	$m^2$	$K_s$	Rauigkeitsbeiwert nach Strickler	$m^{1/3}/s$
B	Wasserspiegelbreite	m	x	Ortskoordinate	
$B_s$	Speicherbreite	m	t	Zeitkoordinate	
R	hydraulischer Radius	m	$\frac{\partial}{\partial x}$	partielle Ableitung nach x	
q	seitliche Zuflüsse	$m^3/s \cdot m$	$\frac{\partial}{\partial t}$	partielle Ableitung nach t	
$\Phi$	Winkel unter dem seitliche Zuflüsse einmünden	grad	$\Delta x$	Ortsschritt	m
			$\Delta t$	Zeitschritt	s
$v_s$	Geschwindigkeit mit der seitliche Zuflüsse einmünden	m/s	a,b,c,d	Martixkoeffizienten	
v	Fließgeschwindigkeit	m/s	Z	Lösungsvektor (H,Q)	
g	Erdbeschleunigung	m/s			

#### Indizes:

- j      Zählvariable in x-Richtung  
i      Zählvariable in t-Richtung

...the ... of ...

## 5. DISKUSSION

Hafner:

Herrn Rös1 möchte ich fragen, welche zeitliche Beschleunigung die geplanten Staustufen für die Hochwasserwelle in Passau bedeuten?

Rös1:

Bei den Hochwasser-Ereignissen, die von mir untersucht wurden, betrug die Beschleunigung im Mittel etwa 24 Stunden.

Glasel:

Die von Herrn Rös1 angegebenen Beschleunigungen im Hochwasser-Ablauf der bayerischen Donau bringen eine ungünstige Oberlagerung der in der Regel voreilenden Innwelle und damit ungünstigere Hochwasser-Abflußverhältnisse für die Unterlieger. Kann man durch bauliche Maßnahmen die zu erwartenden Verschlechterungen noch günstig beeinflussen und damit für die Unterlieger erträglich machen?

Rös1:

Diese Studie ist im Auftrage der Rhein-Main-Donau AG gemacht worden. Sie soll gerade dieses Problem des Zusammentreffens zwischen Innwellen und Donauwellen untersuchen. Es ist natürlich möglich, durch gezielte Änderung der Baumaßnahmen diese großen zeitlichen Verschiebungen zu verändern.

Hafner:

Welche baulichen Maßnahmen können dieses Zusammentreffen bzw. das Zusammenrücken der Inn- und Donauwelle verhindern?

Rös1:

Ich kann Ihnen hierauf keine Antwort geben, da ich nicht über die Planungen der Rhein-Main-Donau AG informiert bin.

Dementjew:

Im Vortrag von Franke/Spiegel wurde die Verteilung des Wasserzuflusses in den Speicher und des Abflusses aus dem Speicher beschrieben. Uns interessiert, ob Vorhersagen über den Wasserzufluß in den Speicher und den Abfluß aus dem Speicher erstellt werden, und wenn ja, wie diese Vorhersagen gemacht werden.

Spiegel:

Aufgrund der historischen Datenanalyse lassen sich mit Hilfe verschiedener mathematischer Modelle Vorhersagen für den natürlichen Abfluß durchführen. Wir haben z.B. auf der Simulationsbasis monatliche Abflüsse generiert. Diese generierte Reihe wurde in das vorgeschlagene Speichermodell gegeben, und mit der Inhaltszufluß abhängigen Abgaberegeln wurde dann die Struktur des Abflusses bzw. der Abfluß selbst - seine Wahrscheinlichkeitsverteilung - prognostiziert.

Blaschke:

Zum Vortrag von Herrn Gruber möchte ich fragen:

1. Welche Verteilungsfunktionen haben Sie für die Häufigkeitsermittlung verwendet?
2. Um ein umfangreicheres Kollektiv zu erhalten, haben Sie die Intervallbreite von 1 Tag auf 10 Tage erweitert. Haben Sie Untersuchungen angestellt, inwieweit sich diese Maßnahme auf das Auflösungsvermögen der Abflußdargebotsfunktion auswirkt?

Gruber:

Zu 1.: Es wird die empirische Häufigkeitsverteilung angewendet.

Zu 2.: Die Untersuchung ergab, daß mit einer größeren Intervallbreite das Auflösungsvermögen abnimmt.

Neumüller:

Zur Frage von Herrn Glasel möchte ich als Angehöriger einer Kraftwerksgesellschaft am Inn darauf aufmerksam machen, daß die Kraftwerke die Beschleunigung von Hochwasserwellen nicht verhindern können, aber sie können die Amplituden der Wellen verringern, und sie werden dies - auch aus eigenem Interesse - tun.

Glasel:

Auch in Österreich bemühen wir uns, die Amplituden der Hochwasserwellen nicht zu erhöhen. Das ist durch die Erhaltung der Retentionsräume und durch die Anordnung von Oberströmungsstrecken möglich. Die Beschleunigung können wir aber nicht ausschalten, und dies bereitet uns doch im Falle des Zusammentreffens von Inn- und Donau-Hochwasserwellen einige Sorgen.

Neumüller:

Die Beschleunigung der Hochwasserwellen in gestauten Flußstrecken ist eine Folge des Verlustes von Retentionsräumen durch Stau, also eines physikalischen und daher unabänderlichen Effekts. Eine wesentliche Verminderung der Beschleunigung ist daher nicht möglich. Wohl aber können die Hochwasserwellen verflacht werden. Energiegewinnung oder Vorteile für die Schifffahrt durch Stau verlangen ihren Preis.

Ginzburg:

Meint Kollege Gruber nicht, daß man die Größe der täglichen Abflußmenge nicht lieber als eine zweidimensionale Gesamtheit zufälliger Größen annehmen sollte, die sowohl nach ihrer Größe als auch nach der Zeit verteilt sind? Die Vernachlässigung durch die zweite Messung, wie es in der Arbeit von Herrn Gruber geschieht, kann zu einer Instabilität der Ergebnisfunktionen führen. Das wird z.B. der Fall sein, wenn in die Reihe Angaben aus den Jahren 1974 - 1975 eingefügt werden, als im Januar hoher Wasserstand war.

Gruber:

Die Zufallsgröße Zeit wurde aus technischen Gründen vernachlässigt.

Schiller:

Zum Vortrag von Herrn Rösl möchte ich folgendes bemerken: In der Diskussion wurde die Sorge geäußert, daß die beschriebene Beschleunigung des Hochwasserablaufes durch die geplanten Staustufen an der Donau eine Verschärfung der Hochwassergefahr für die Unterlieger bringen könnte. Dies könnte geschehen, wenn die Welle der Donau näher an die - in den meisten Fällen - vorauslaufende Hochwasserwelle des Inn heranrückt. Ich darf dazu bemerken, daß am Inn bereits eine rd. 200 km lange Staustufenkette besteht. Die letzte Stufe ist z.Zt. im Bau. Eine Hochwasseruntersuchung des Inn, die noch nicht ganz abgeschlossen ist, hat gezeigt, daß am Inn der Hochwasserablauf wesentlich beschleunigt wurde. Die zu erwartende Beschleunigung durch den Staustufenbau holt die am Inn bereits eingetretene Entwicklung nach.

Gruber:

Ich habe noch eine Bemerkung zu dem Vortrag von Herrn Rösl: Es ist bei mathematischen Modellen genauso wie bei physikalischen Modellen die Annahme üblich, daß das Bett des Modells dicht ist. Bei physikalischen Modellen ist die größte Sorge, daß das Wasser nicht versickert. Bei mathematischen Modellen liegen Querprofile vor, die die Geländeoberkante begrenzen. Das, was sich unter der Geländeoberkante abspielt, kann weder mit dem mathematischen noch mit dem physikalischen Modell erfaßt werden. Ich denke vor allem an Überflutungsgebiete, wie sie in Österreich gegeben sind. Diese Überschwemmungsgebiete sind alluviale

Füllungen mit Schottern, die eine Porenziffer von etwa 30% aufweisen. Wenn diese Schotterkörper lange Zeit nicht mit Grundwasser gefüllt sind, d.h., daß einem Hochwasser eine lange Nieder- und Mittelwasserzeit vorangegangen ist, dann ist der Porenraum des Schotterkörpers auf eine Höhe von etwa 3 m mit Luft gefüllt. Kommt nun ein Hochwasser, das in kurzer Zeit eine Wasserstandsänderung bewirkt, und zwar vom Mittelwasser bis zum überflutenden Hochwasser, dann wird dieser Porenraum mit Wasser gefüllt; dies entspricht pro Meter Grundwasserstandanhebung einer Wassersäule von 30 cm. Im Tullnerfeld z.B. ergibt sich bei einer Wasserstandsdifferenz von 3 - 4 m eine Wassersäule von etwa 1 Meter. Dies ist ein echter Retentionsraum. Wenn man nun zwei Hochwässer vergleicht und zwar eines im Winter nach einer langen Frostperiode und andererseits das gleiche Hochwasser im Sommer, so ist im Winter aufgrund des Bodenfrostes wesentlich weniger Retentionsraum gegeben. Dieser Retentionsraum wird weder von einem physikalischen noch von einem mathematischen Modell erfaßt. Ich sehe darin aber für die Sommerhochwässer eine gewisse Reserve und Sicherheit gegenüber den Aussagen eines mathematischen Modelles.

Mendel:

Bei einem empirischen Flood-Routing-Modell der Bundesanstalt für Gewässerkunde wird dieser Uferspeicherungseinfluß zunächst sehr summarisch berücksichtigt. Parameter ist der Grundwasserstand im Uferbereich. Eine Vernachlässigung der Uferspeicherung erfolgt also nur bei hohen Grundwasserspenden sowie bei negativer Bodentemperatur.

Podani:

1. Zum Referat von Spiegel schlage ich den Autoren vor, die Wahrscheinlichkeitsverteilung zum Aufzeigen der Verlängerung des natürlichen Abflusses unterhalb des Stauraumes zu verwenden.
2. Ich schlage weiter vor, die Frage der Optimierung der Gegenhochwassermenge des Stauraums ( $V_p$ ) zu untersuchen und dabei die Zeit der Vorhersagefrist ( $\tau_p$ ) und die Zeit (Möglichkeit) der Entleerung des Stauraumes ( $\tau_o$ ) zu berücksichtigen.

## 5. Д И С К У С С И Я

Гафнер:

Господина Ресля я хотел бы спросить, какое временное ускорение запланированные подпорные ступени для волн паводья в Пассау?

Ресль

У тех результатов паводков, которые мною исследовались, ускорение составляло в среднем приблизительно 24 часа.

Глазель:

Приведенные господином Реслем ускорения в стоке паводков баварского Дуная вносят неблагоприятное напластование, как правило спешных волн Инна, и тем самым неблагоприятные условия стока для нижележащих районов. Возможно ли посредством строительных мероприятий повлиять благоприятно на ожидаемые ухудшения и сделать их для нижележащих сносными?

Ресль:

Это исследование выполнено по заказу акционерного общества Рейн-Майн-Дунай. Оно как раз

и должно изучить проблему встречи волн Инна и волн Дуная. Естественно можно считать возможным, посредством целенаправленных изменений строительных мероприятий, изменить эти большие временные смещения.

**Гафнер:**

Какие строительные мероприятия могут предотвратить эту встречу, т.е. сдвигание волн Инна и Дуная?

**Ресль:**

Я не могу ответить Вам на этот вопрос, так как я не проинформирован по поводу планировки в акционерном обществе Рейн-Майн-Дунай?

**Дементьев:**

В докладе Франке-Шпигеля описано распределение притока воды в водохранилище и оттока воды из него по многолетним данным. Нас интересует, составляются ли прогнозы притока воды в водохранилище или оттока из него и как используются эти прогнозы?

**Шпигель:**

На основе исторического анализа данных возможно, с помощью различных математических моделей, давать прогнозы для естественного стока. Мы генерировали месячные стоки, например, на базе моделирующих устройств. Этот генерированный ряд подавался в предложенную модель накопителя, и с помощью объема притока с зависимыми правилами передачи прогнозировалась тогда структура стока, т.е. собственно сток - его вероятное распределение.

**Блашке:**

По поводу доклада господина Грубера я хочу спросить:

1. Какие распределительные функции применяли вы для определения частоты?
2. Для получения более широкого коллектива, вы увеличили ширину интервала с одного до десяти дней. Предпринимали ли вы исследования того, как сильно это мероприятие влияет на возможность развязывания функции стока естественных ресурсов?

**Грубер:**

К 1.: Применяется эмпирическое распределение частот.

К 2.: Из исследования вытекало, что с большей шириной интервала возможность развязывания уменьшается.

**Ноймюллер:**

По поводу вопроса господина Глазеля я, как член общества электростанций на Инне, хотел бы обратить внимание на то, что электростанции не могут предотвратить ускорение волн паводков, но они могут уменьшить амплитуды этих волн, и это они и сделают из собственных интересов.

**Глазель:**

И в Австрии мы заботимся о том, чтобы амплитуды волн паводков не повышались. Это возможно посредством сохранения пространств задержания и посредством размещения водосливных пространств. Ускорение мы, однако, не можем исключить, и это вызывает у нас все же, в случае встречи паводков волн Инна и Дуная, некоторые заботы.

**Ноймюллер:**

Ускорение паводковых волн в подпертых речных створах являются следствием потери в водослив-

ных пространствах посредством подпоров, т.е. одного физического, и поэтому неизменного эффекта. Значительное уменьшение ускорения поэтому невозможно. Однако волны паводков могут быть выравнены. Добывание энергии или выгода для судоходства посредством подпоров требует свою цену.

Гинзбург:

Не считает ли коллега Грубер, что величины ежедневных расходов лучше было бы рассматривать как двухмерную совокупность случайных величин, распределенных как по величине, так и по времени? Пренебрежение вторым измерением, как это имеет место в работе г. Грубера может привести к неустойчивости получаемых функций. Так, в частности, видимо, получается, когда будут включены в ряд данные за 1974 - 1975 годы, когда в январе была высокая водность.

Грубер:

Время, как случайная величина, пренебрегалось по техническим причинам.

Шиллер:

К докладу господина Ресля я хотел бы заметить следующее: В дискуссии выражалась озабоченность, что описанное ускорение стока паводка посредством запланированных ступенчатых подпоров на Дунае может привести к обострению угрозы наводнения для нижележащих. Это может случиться, если волна Дуная придвинется ближе к - в большинстве случаев - впереди бегущей волне паводка Инна. Я могу к этому заметить, что на Инне уже имеется цепь ступенчатых подпоров длиной около 200 км. Последняя ступень находится в настоящее время в стадии строительства. Исследование половодья Инна, которое еще не полностью завершено, показало, что на Инне сток паводка значительно ускорен. Ожидаемое ускорение посредством строительства ступенчатых подпоров на Дунае догоняет развитие, которое уже имеет место на Инне.

Грубер:

У меня имеется еще одно замечание к докладу господина Ресля: У математических моделей, также как и у физических моделей, принято считать, что основание модели является непроницаемым. У физических моделей наибольшую заботу вызывает то, чтобы не просачивалась вода. У математических моделей имеются поперечные сечения, которые ограничивают верхний край местности. То, что размыгривается под верхним краем местности невозможно охватить ни математической, ни физической моделью. Я думаю прежде всего о пойменных районах, как они представлены в Австрии. Эти области затопления являются аллювальными наполнениями со щебнями, пористость которых составляет приблизительно 30%. Если эти щебенчатые тела длительное время не наполняются водой, т.е. если паводку предшествует длительное время межени или средний уровень воды, то поровое пространство щебенчатого тела наполнено воздухом до высоты  $\approx$  в 3 м. Если теперь наступает половодье, которое за короткое время вызывает изменение уровня воды, а именно от среднего уровня воды до затапливаемого паводка, то это поровое пространство заполняется водой; это соответствует водяному столбу в 30 см на каждый метр подъема уровня грунтовых вод. В Туллнерфельде, например, при разнице уровня воды в 3-4 м получается водяной столб приблизительно в 1 метр. Это настоящее пространство задерживания. Если теперь сравнить два половодья, а именно, одно зимой после длительного периода холода, и, с другой стороны, равнозначное половодье летом, то зимой, вследствие морозного основания, пространства задерживания значительно меньше. Это пространство задерживания невозможно охватить ни физической, ни математической моделью. Я вижу в этом, однако, определенный резерв для летних половодий и уверенность по отношению к высказываниям математической модели.

**Мендель:**

У эмпирической модели Флута-Рутинга Федерального гидрологического института это влияние берегового накопителя учитывается пока очень суммарно. Параметром является уровень грунтовых вод в районе берегов. Пренебрежение береговым накопителем производится, значит, лишь при высоком модуле стока грунтовых вод, а также и при отрицательных температурах почвы.

**Подани:**

1. Предлагаю к реферату Шпигеля авторам использовать вероятностные клетчатки для выявления изменения естественного расхода ниже водохранилища.
2. Изучить вопрос оптимизации противопаводкового объема водохранилища ( $V_p$ ), учитывая время заблаговременности прогноза ( $\zeta_p$ ) и время (возможность) опорожнения водохранилища ( $\zeta_0$ ).

КРОСКОРРЕЛЯЦИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ГОДОВОГО СТОКА  
РЕК ЮГОСЛАВИИ И ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУ-  
ЛЯЦИИ И СОЛНЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИХ  
СВЕРХДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Прохаска С.

ABHÄNGIGKEIT ZWISCHEN MITTLEREM JAHRESABFLUSS DER FLOSSE  
JUGOSLAWIENS UND DER CHARAKTERISTIK DES ATMOSPHERISCHEN  
KREISLAUFPROZESSES SOWIE DER SONNENEINSTRALUNG

Prohaska S.

Резюме

В статье излагаются основные положения кросскорреляционного исследования причинно-следственной связанности годового стока рек Югославии и характеристик процессов атмосферной циркуляции и солнечной деятельности. На основании анализа результатов исследований получен вывод о возможности районирования рек Югославии, т.е. по структуре колебания годового тока реки Югославии можно разделить на две группы с противоположным характером связи с солнечно-атмосферными индексами. К первой группе относятся реки Нижний Дунай (после впадения Тиссы и Савы), Тисса и Сава, а ко второй группе - Верхний Дунай (до впадения Тиссы) и В.Морава.

Полученные результаты кросскорреляционного исследования определяют вид прогностического модели, который также представляется в данной работе. Качество прогнозов дано посредством существующих методик оценки сверхдолгосрочных гидрологических прогнозов.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden auf der Grundlage kreuzkorrelativer Untersuchungen die Abhängigkeit des mittleren Jahresabflusses der Flüsse Jugoslawiens von der Charakteristik des atmosphärischen Kreislaufprozesses und der Sonneneinstrahlung dargelegt. Aufgrund einer Analyse von Untersuchungsergebnissen gelangte man zu einer Untergliederung der Flußgebiete Jugoslawiens. Entsprechend der Schwankungsstruktur des mittleren Jahresabflusses dieser Flüsse werden zwei Gruppen mit entgegengesetztem Verbindungscharakter solar-atmosphärischer Indexe unterschieden. Zur ersten Gruppe gehören die Flüsse der unteren Donau (nach der Theiß- und Sawa-Mündung), die Theiß und die Sawa, zur zweiten Gruppe die Flüsse der oberen Donau oberhalb der Theißmündung und der Großen Morava.

Durch die Ergebnisse der kreuzkorrelativen Untersuchungen wird die Gestalt des ebenfalls in dieser Arbeit dargestellten Prognose-Modells definiert. Die Qualität der Prognose wird mittels bestehender Schätzmethoden überlangfristiger hydrologischer Prognosen dargestellt.

Основной задачи гидрологии, как и любой науки о природе, является анализ существующего и прогноз будущего состояния элементов гидрологического режима. При этом учитывается, что современное плановое хозяйство основано на перспективе развития водопотребления на достаточно длительный срок, особенно важной является задача анализа закономерности многолетнего колебания речного стока и разработка методики их сверхдолгосрочного прогнозирования.

До недавнего времени все методы исследования главным образом относились на анализ многолетних изменений некоторых характеристик водного режима. Прогнозы практически отсутствовали, что существенно снижало народнохозяйственную ценность гидропрогнозов в целом. В последние годы в этом отношении наметился известный перелом, связанный в частности с применением теории случайных функций при анализе и прогнозе гидрометеорологических явлений. Методика этих исследований заключается в стохастическом изыскании внешних и внутренних причинно-следственных связей.

Настоящая работа представляет собой изыскание "генезиса" между речным стоком рек Югославии и характеристик процессов атмосферной циркуляции и солнечной деятельности на основании теории случайных функций. На основании результатов этих анализов разработана методика сверхдолгосрочного прогнозирования речного стока рек Югославии. Все расчеты сделаны в рамках выполнения кандидатской диссертации на кафедре гидропрогнозов в Ленинградском гидрометеорологическом институте под руководством Др.тех.наук проф. Ю.М.Алехина.

Имея в виду, что в основном исследовалась причинно-следственная связь речного стока и характеристик процессов атмосферной циркуляции и солнечной деятельности, надо подчеркнуть что все исследования обоснованы на кроскорреляционной теории случайных функций. С этой целью произведены довольно обширные расчеты тесноты кроскорреляционных связей годового стока рек Югославии с годовыми значениями индексов солнечной активности (числа Вольфа) и атмосферной циркуляции (типы W, E и C по Вангенгейму и  $J_a^{VI}$  и  $J_z^{VI}$  по Вительсу).

На первом этапе эти вычисления производились для годовых интервалов, в обычной традиционной манере, т.е. определялись коэффициенты корреляции между годовыми значениями стока и указанными индексами по формуле:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{I=1}^n \Delta x \Delta y}{n \delta_x \delta_y} \quad [1]$$

$\Delta x, \Delta y$  - отклонения соответственных величин стока и индексов от норм  
 $n$  - число членов в рядах

$\delta x, \delta y$  - среднеквадратические отклонения соответствующих рядов стока и индексов.

Таблица 1

Река - пункт	Площадь водосбора км <sup>2</sup>	модуль м <sup>3</sup> /сек км <sup>2</sup>	Коэффициент корреляции связи годового стока с год. индексами атм. циркуляции и солнечной активности					
			W <sub>0</sub>	E	W	C	$J_a^{VI}$	$J_z^{VI}$
Дунай - Оршава	576232	9.31	-0.05	-0.03	-0.15	-0.02	-0.19	0.07
Бездан	210250	11.70	-0.07	0.04	-0.19	0.16	-0.32	-0.18
Богоево			0.01	0.05	-0.30	0.14	-0.40	-0.22
Тисса - Санта	157174	5.09	-0.16	-0.06	-0.03	0.13	-0.05	0.06
Сава - Ср.Митровица	87996	17.22	-0.12	-0.03	-0.12	-0.06	-0.07	0.14
Сл.Брод			-0.13	-	-0.20	-	-0.26	0.16
Драва-Д.Михолец	37142	16.80	-0.14	0.36	-0.12	-0.31	-0.35	0.30
В.Морава-Лю.Мост	37320	5.63	0.22	-0.12	-0.16	0.33	-0.17	-0.19

В результате расчетов (табл.1) оказалось, что корреляция годового стока рек Югославии с солнечной активностью, в основном, отрицательна (от - 0.05 до - 0.16); с западным и с восточным типом циркуляции также отрицательна со значениями коэффициентов корреляции от 0.03 до - 0.30; с меридиальным типом циркуляции может быть и положительной и отрицательной. Корреляция стока с антициклоническим типом циркуляции Вительса всегда отрицательна (от 0.05 до - 0.40); с циклоническим - преимущественно положительная. Таким образом, связь колебаний годового стока рек Югославии с солнечной активностью и атмосферной циркуляцией оказалась недостаточно тесной. Однако интересно, что эта связь почти во всех случаях по всей территории имеет одинаковый знак.

Принимая во внимание что между годовыми значениями стока и индексов получена слабая связь, в дальнейшем исследовалась их корреляционная зависимость при различных значениях сдвига  $\tau$ , используя следующую формулу:

$$R_{x_{\tau} y} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_{i\tau} \Delta y_i}{n \delta_x \delta_y} \quad [2]$$

Приведенный анализ, выполненный по принципам, указанным выше, называется в мировой литературе кроскорреляционным анализом случайных процессов.

Первая оценка качества связи была выполнена на основании теста значимости Андерсона (8). Андерсон поставил следующую гипотезу: если с определенной степенью вероятности для временного ряда  $x(t)$  значения корреляционной функции приблизительно равны нулю,  $r(\tau) \approx 0$ , то, можно сказать, что он составлен из серии независимых событий. Тест основан на циклической нормальной случайной серии длинных  $N$ . При этих вышеуказанных условиях и значения корреляционной функции имеют приблизительно нормальное распределение со следующим параметром:

$$M [\hat{r}] = 1/N - (\tau - 1) \quad [3]$$

$$D [\hat{r}_{\tau}] = (N - \tau - 2) / (N - \tau - 1) \quad [4]$$

Доверительные пределы Д.П. для расчета значений  $\hat{r}_{\tau}$  определяются по формуле:

$$D.П. [\hat{r}_{\tau}] = \frac{1 \pm Z_{\alpha} \sqrt{N - \tau - 2}}{(N - \tau - 1)} \quad [5]$$

где:  $Z_{\alpha}$  - является нормальной переменной соответствующей уровню значимости  $\alpha$ .

Если  $\hat{r}$  попадет вне доверительных интервалов, нулевая гипотеза о том, что составляющие случайного процесса независимы, отвергается.

Как показано на рис.1-3 (аналогичные результаты получены для всех рядов стока и индексов) величины полученных кроскорреляционных коэффициентов указывают на то, что между рассматриваемыми явлениями связь слабая. Проверка по тесту значимости Андерсона только подтверждает выведенную констатацию о случайном характере связанности годовых значений стока и индексов.

Наличие слабой связи не подтверждает отсутствие общей связи между рассматриваемыми явлениями. Для получения общей картины связанности, нужно рассматривать динамическую структуру природных явлений.

В связи с этим, второй этап исследований заключался в определении коэффициентов корреляции средних значений стока и указанных индексов за  $m = 2, 3, \dots$  лет:

$$R_{x_m y_m} = \frac{\sum_{i=1}^{n(m+1)} x_{mi} y_{mi}}{(n-m+1) \delta_{x_m} \delta_{y_m}} \quad [7]$$

где:  $x_{mi} y_{mi}$  - средние летние значения годового стока и солнечно-атмосферных индексов в отклонениях от соответствующих норм за совместный период наблюдений

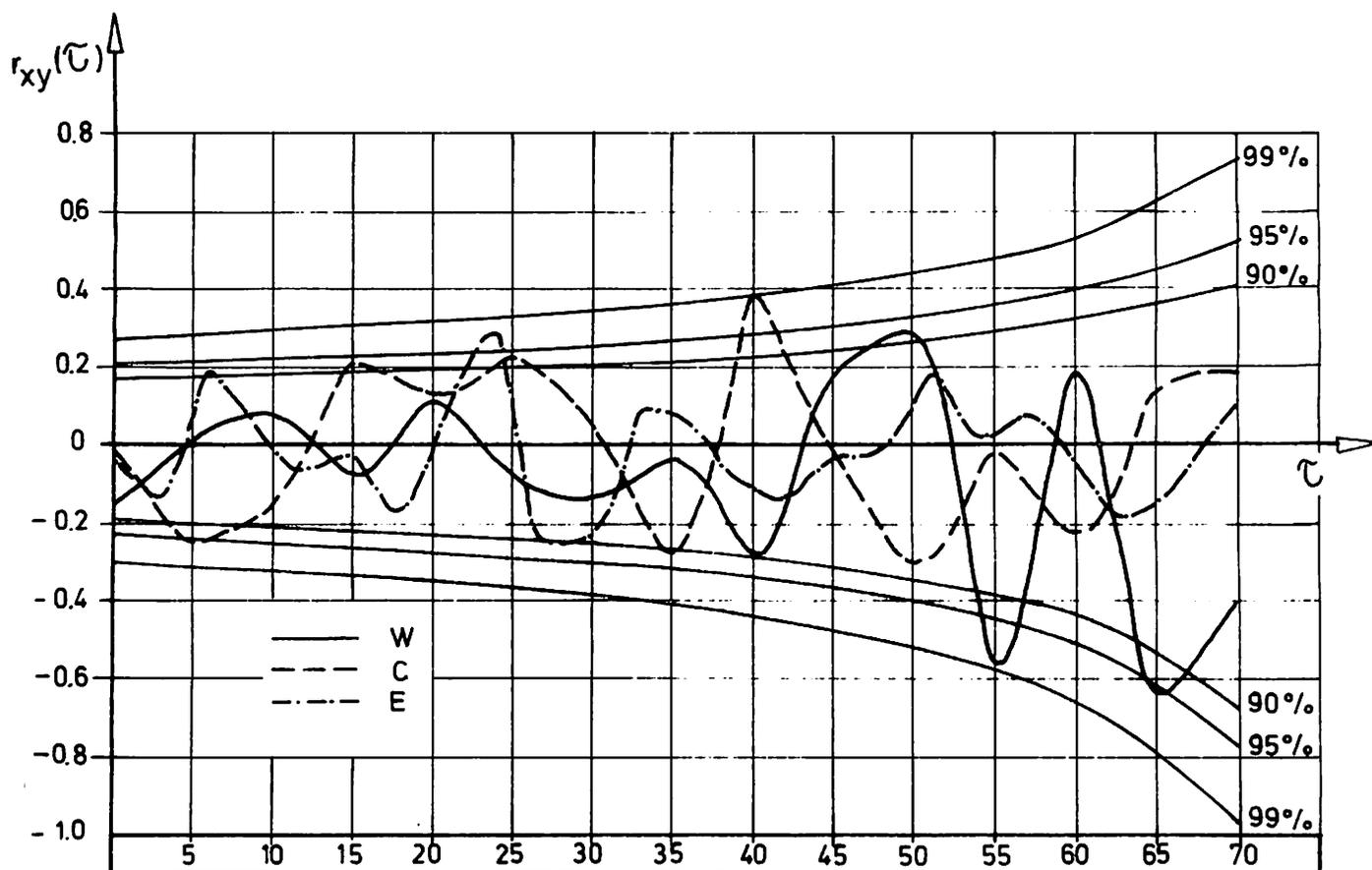


Рис. 1 Кросскорреляционные функции среднегодовых стока р. Дунай-Оршова и индексов атмосферной циркуляции Вангенгейма

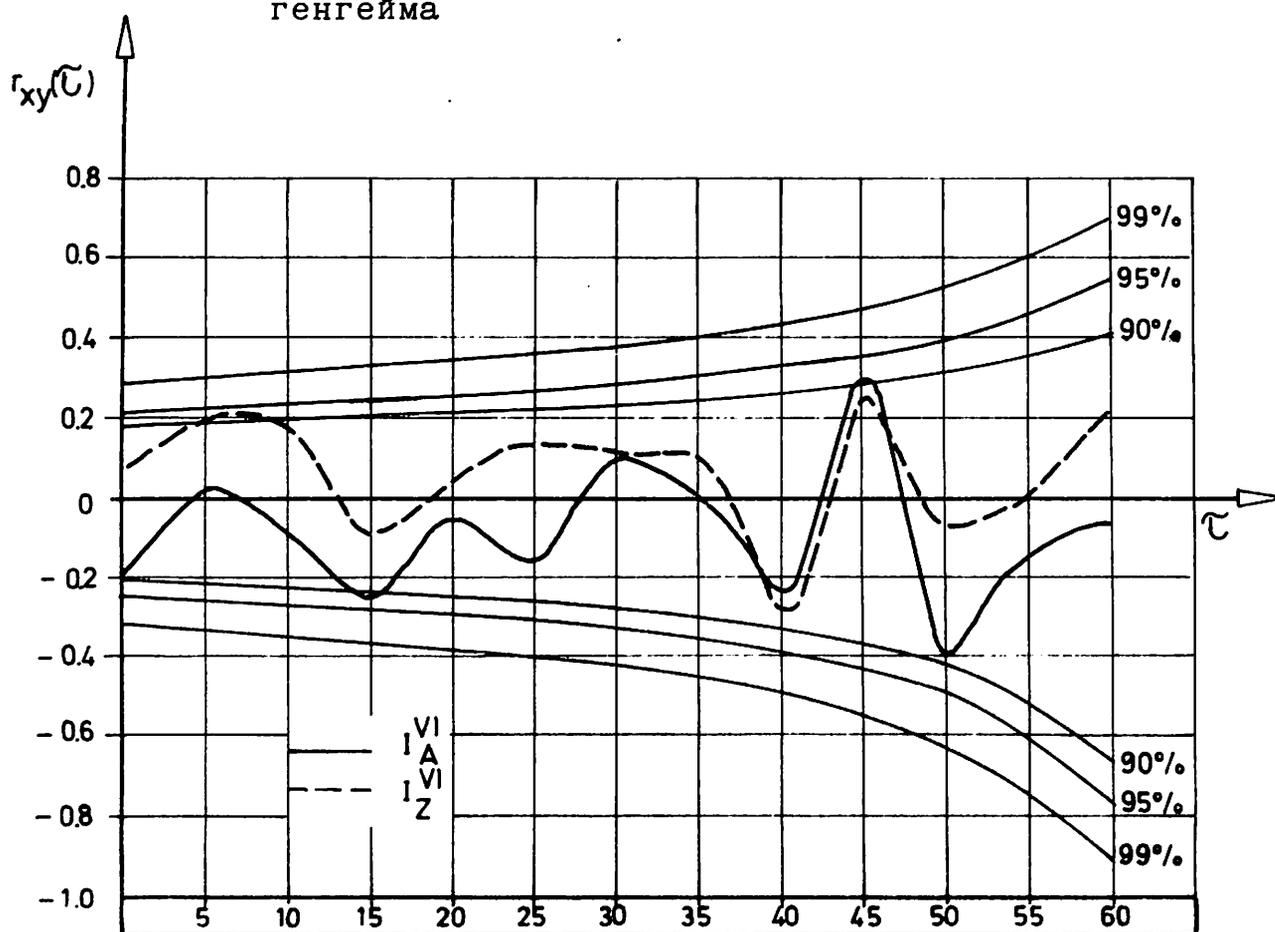


Рис. 2 Кросскорреляционные функции среднегодовых стока р. Дунай-Оршова и индексов атмосферной циркуляции Вительса

$\delta x_m, \delta y_m$  - дисперсия рядов  $x_m$  и  $y_m$ , которые определяются по формуле:

$$\delta x_m = \frac{\delta x}{\sqrt{m}} K_{r_1} \quad ; \quad \delta y_m = \frac{\delta y}{\sqrt{m}} K_{r_2} \quad [8]$$

$K_{r_1}, K_{r_2}$  - коэффициенты, учитывающие корреляционную связь между членами  $x$  и  $y$ .

$$K_r = \sqrt{1 + \frac{2}{m} [(m-1)r_1 + (m-2)r_2 + \dots + r_{m-1}]} \quad [9]$$

$r_1$  - Коэффициенты внутрирядной корреляции (автокорреляционной функции) членов данного ряда.

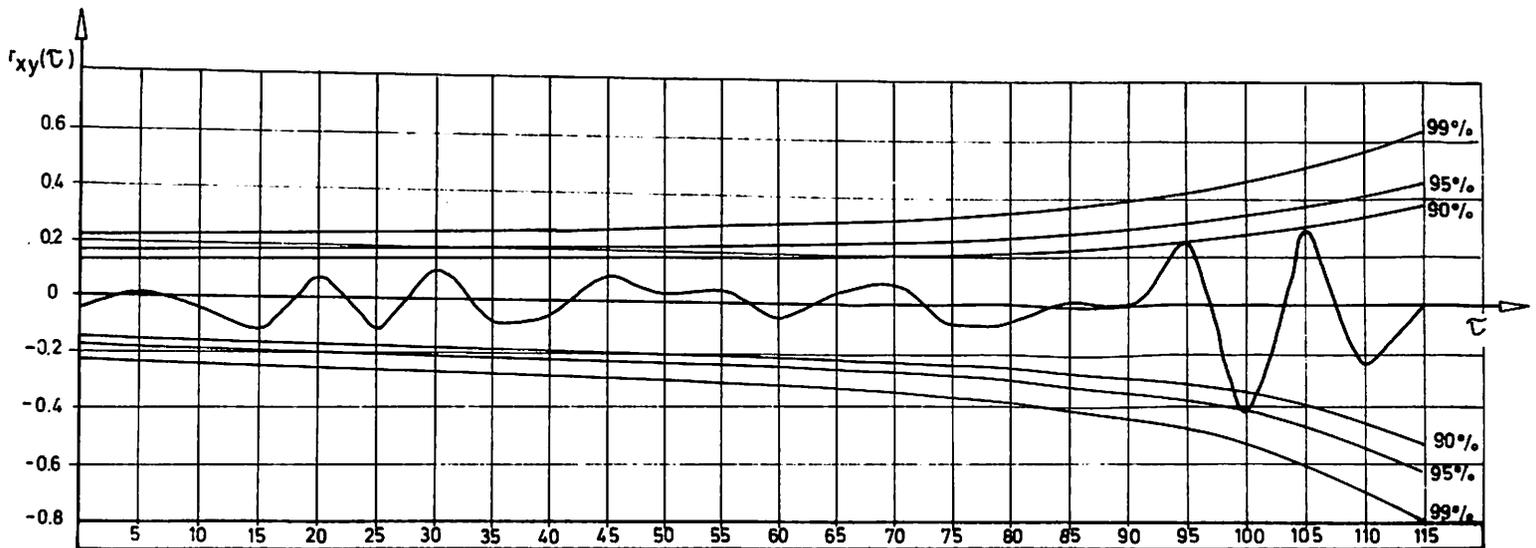


Рис. 3. Кроскорреляционная функция среднегодового стока р. Дунай - Оршова и числа Вольфа.

Как показано в литературе (4, 7) легко можно показать что при:

$$r_i = 0 \quad R_{x_m y_m} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \delta_x \delta_y} = R_{xy} \quad [10]$$

$$r_i \neq 0 \quad R_{x_m y_m} = R_{\bar{x}\bar{y}} \left( \frac{m+2ab}{m+b} \right) + \frac{m R_{\alpha\beta}}{m+2b} \quad [11]$$

Это значит, что, если корреляционные ряды являются частично детерминированными и имеют ясно выраженные функции широкого диапазона, и, тем более, если их корреляционные функции являются подобными, то коэффициент корреляции связи средних  $m$ -летних значений этих рядов может резко повысится.

В результате для каждой пары рядов сток-индекс была получена последовательность коэффициентов  $R_{x_m y_m}(m)$ , описывающая динамику скоррелированности сопоставляемых рядов при изменении периода их осреднения  $m = 2, 3, \dots$  лет. Понятно, что эта динамика должна быть производной или результирующей цикличности рядов  $x$  и  $y$ .

Таким образом, последовательность величин  $R_{x_m y_m}(m)$ , названная  $m$ -коррелограммой стока  $x$  и солнечно-атмосферного индекса  $y$ , характеризует внутрирядную связанность  $x$  и  $y$  и позволяет установить для каждого индекса  $y$  эффективные значения  $m$ , при которых  $R_{x_m y_m}$  достигают максимума. Для иллюстрации на рис. 4 приводится  $m$ -коррелограмма для годового стока р. Дунай - Оршава и солнечно-атмосферных индексов Вольфа, Вангенгейма и Вительса. Аналогичные  $m$ -коррелограммы построены для 9 рядов годового стока.

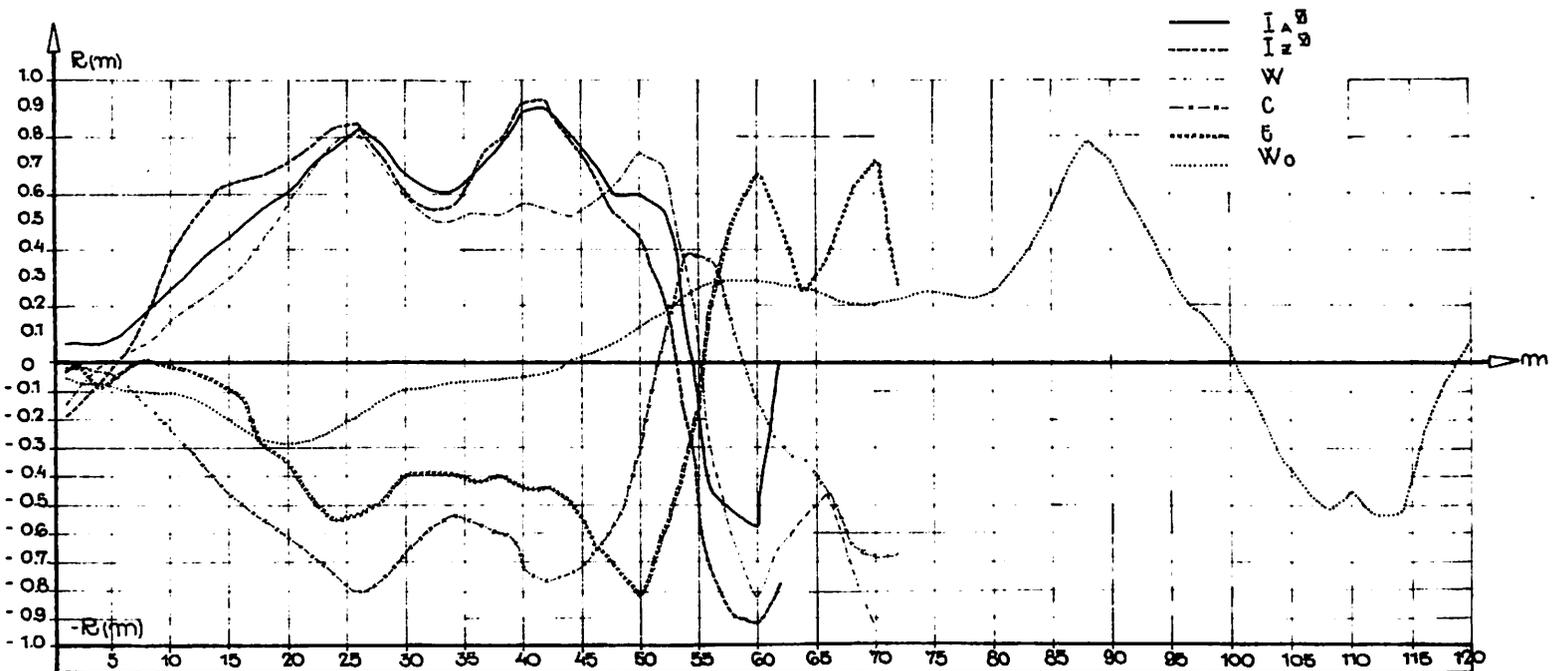


Рис. 4.  $m$ -коррелограммы осредненного стока р. Дунай - Оршава с солнечно-атмосферными индексами.

Представлялось интересным проанализировать характер изменения солнечно-атмосферных связей колебаний стока по всей территории Югославии при различных периодах осреднения. С этой целью были построены совмещенные графики  $m$ -коррелограмм. В качестве примера на рис. 5-6 представлены  $m$ -коррелограммы стока рек Югославии и индексов Вангенгейма  $C$  и Вительса  $I_Z^n$ . Оказалось, что по характеру  $m$ -коррелограмм реки Югославии можно разделить на 2 группы с противоположным характером связи.

К первой группе относятся реки нижнего Дуная, Тиссы и Савы. Эта группа отличается тем, что при общем увеличении коэффициентов корреляции с возрастанием периода осреднения сохраняется знак связи, положительный для индексов циркуляции Вительса  $I_a^n$  и  $I_Z^n$  и индекса

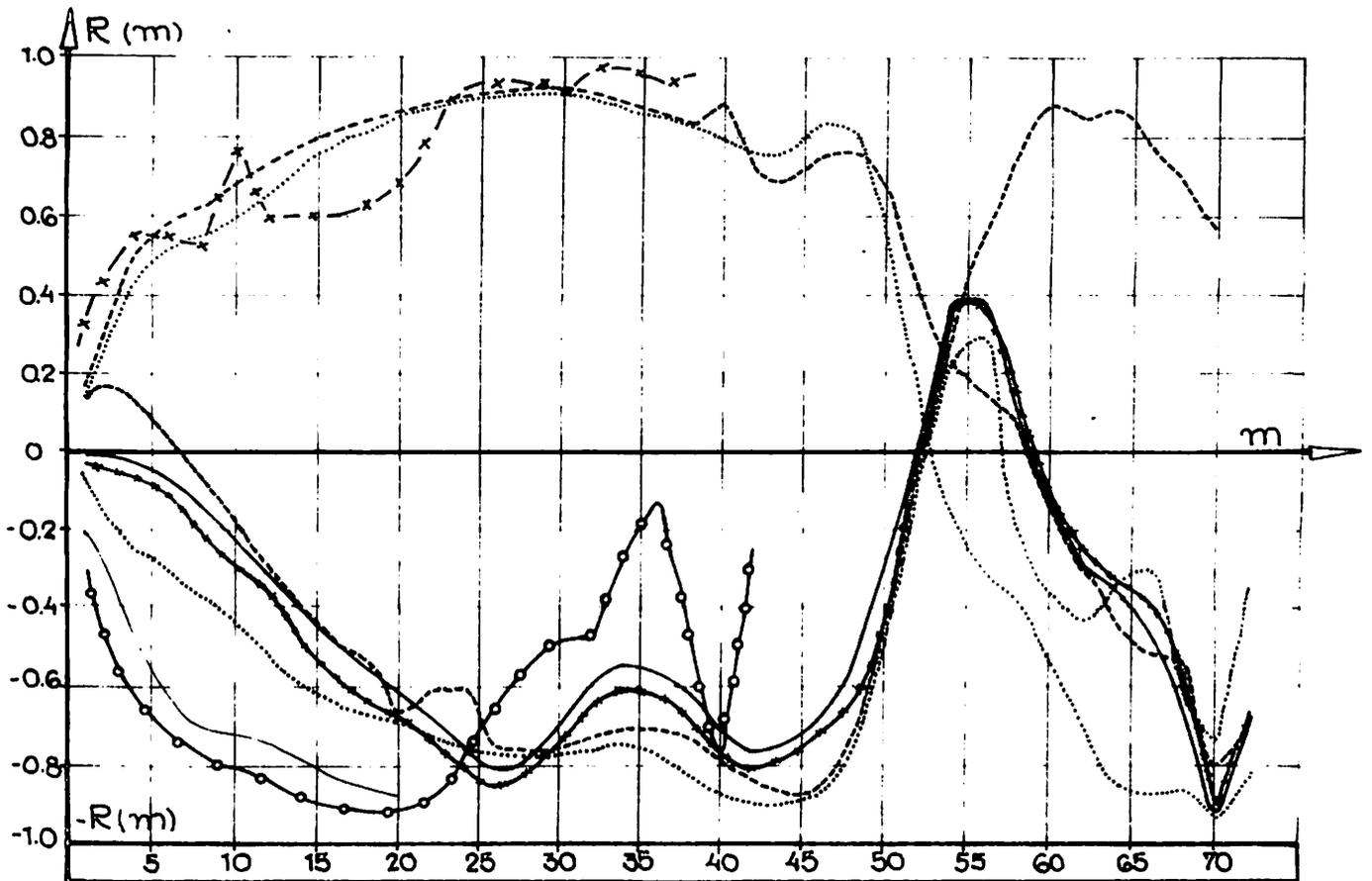


Рис. 5  $m$ -коррелограммы осредненного стока рек Югославии с индексом атмосферной циркуляции Вангенгейма С

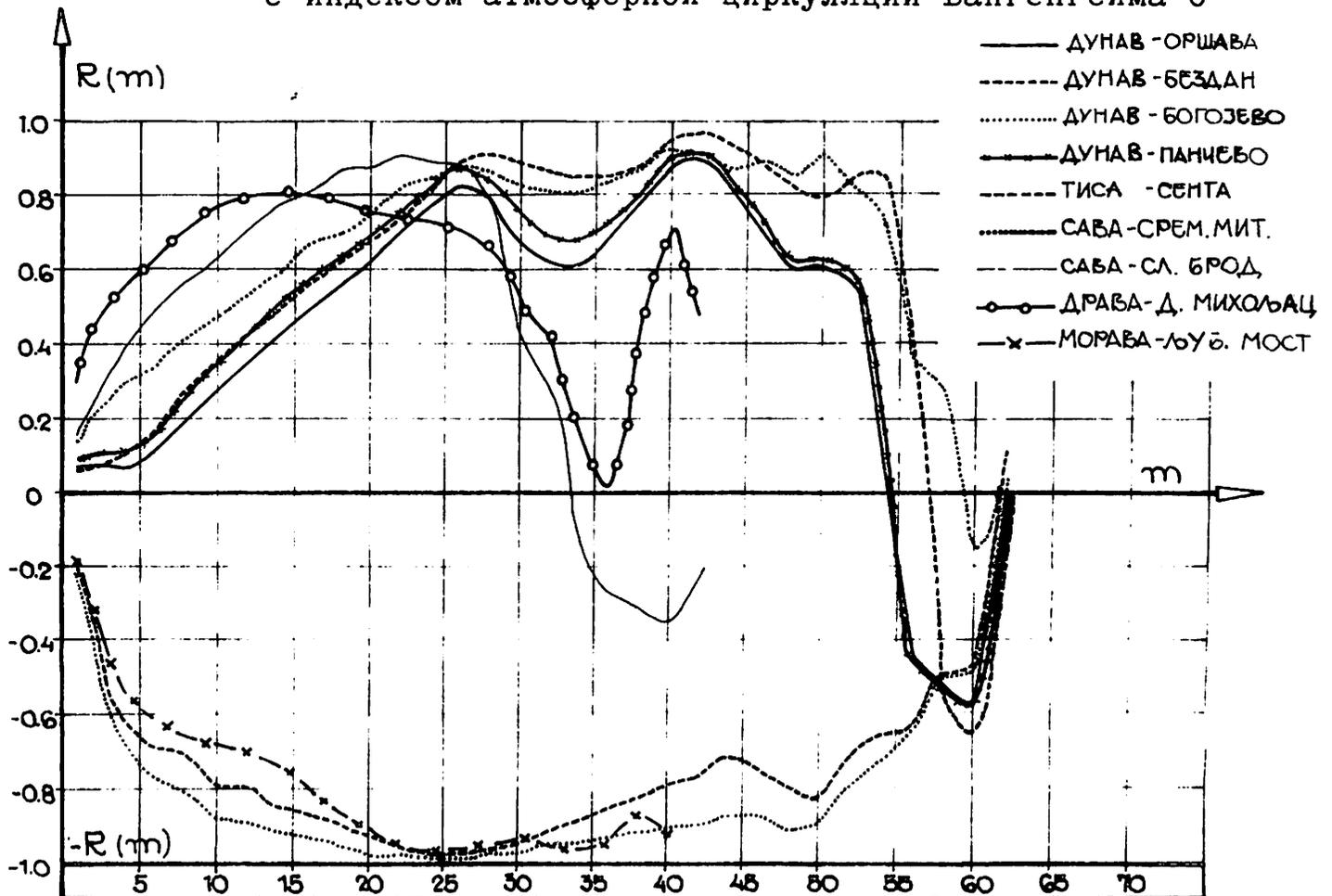


Рис. 6  $m$ -коррелограммы осредненного стока рек Югославии с индексом атмосферной циркуляции Вителься

Вангенгейма  $W$ , а для индексов циркуляции Вангенгейма  $C$  и  $E$  и чисел Вольфа, отрицательный.

Ко второй группе относятся реки верхнего Дуная и В. Моравы. С возрастанием периода осреднения положительная связь здесь получается для индексов циркуляции Вангенгейма  $C$  и  $E$  и числа Вольфа, а отрицательная для индексов Вительса  $I_a^n$  и  $I_z^n$  и Вангенгейма  $W$ .

Построение  $m$ -коррелограмм является принципиально новым элементом в исследованиях солнечно-атмосферных связей, а вывод о возможности районирования рек Югославии представляет собой главный вывод этого исследования.

Третий этап исследования заключается в выявлении динамики величины  $R_{m\tau}$   $Y_m$  по периоду осреднения при сдвиге периодов  $\tau$  в рядах  $x$  и  $y$  относительно друг к другу на  $\tau = 1, 2, \dots$  лет (рис. 7). Иными словами, исследовалась кроскорреляционная зависимость осредненных величин стока и индексов.

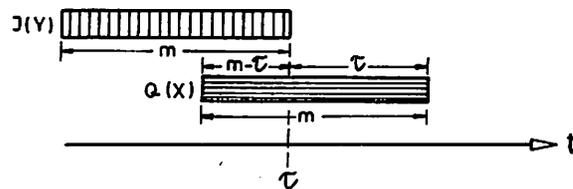


Рис. 7.

На этом рисунке символически указано взаимоотношение периодов осреднения, солнечно-атмосферного индекса  $I(y)$  и стока рек  $Q(x)$  по шкале календарных лет.

В этом случае для каждого  $m = 2, 3, \dots$  задаются последовательностью  $\tau = 1, 2, \dots$  и для каждого сочетания  $\tau$  и  $m$  вычисляется коэффициент корреляции рядов  $Q$  и  $J$ . Последовательности этих коэффициентов для  $m = 1, 2, \dots$  и нескольких значений сдвига  $\tau$  (параметр) называются  $m\tau$ -коррелограммы.

В качестве примера на рис. 8-9 приводятся  $m\tau$ -коррелограммы стока реки Дунай - Оршава и индексов атмосферной циркуляции Вангенгейма  $C$  и Вительса  $I_z^V$  при различных значениях сдвига  $\tau$ . Также на рис. 10 приводятся  $m\tau$ -коррелограммы стока реки Дунай - Оршава и рассматриваемых индексов за постоянный период осреднения  $m = 30$  лет. На основании этих рисунков видно, что циклический характер  $m\tau$ -коррелограммы сохраняется, а сами коэффициенты корреляции увеличены. Имея в виду уравнения [10] и [11] этот факт подтверждает наличие внутривременной связи между рассматриваемыми явлениями.

Основное назначение  $m\tau$ -коррелограммы прогнозирование стока  $Q$  по солнечно-атмосферным индексом  $J$ . Производится это следующим образом. С помощью  $m\tau$ -коррелограмм выявляются такие сочетания  $m$  и  $\tau$ , при которых коэффициент корреляции  $R_{m\tau}$  рядов  $Q_{m\tau}$  и  $J_{m\tau}$  достигают большой величины, а именно  $R_{m\tau} \geq 0.80$ .

Для этих значений  $R_{m\tau}$  дается прогноз среднего стока за период по среднему индексу циркуляции, взятому со сдвигом  $\tau$ :

$$[\bar{Q}_{m,\tau}]_{\text{prog}} = R_{m\tau} \frac{Q_m}{\delta J_m} \quad [12]$$

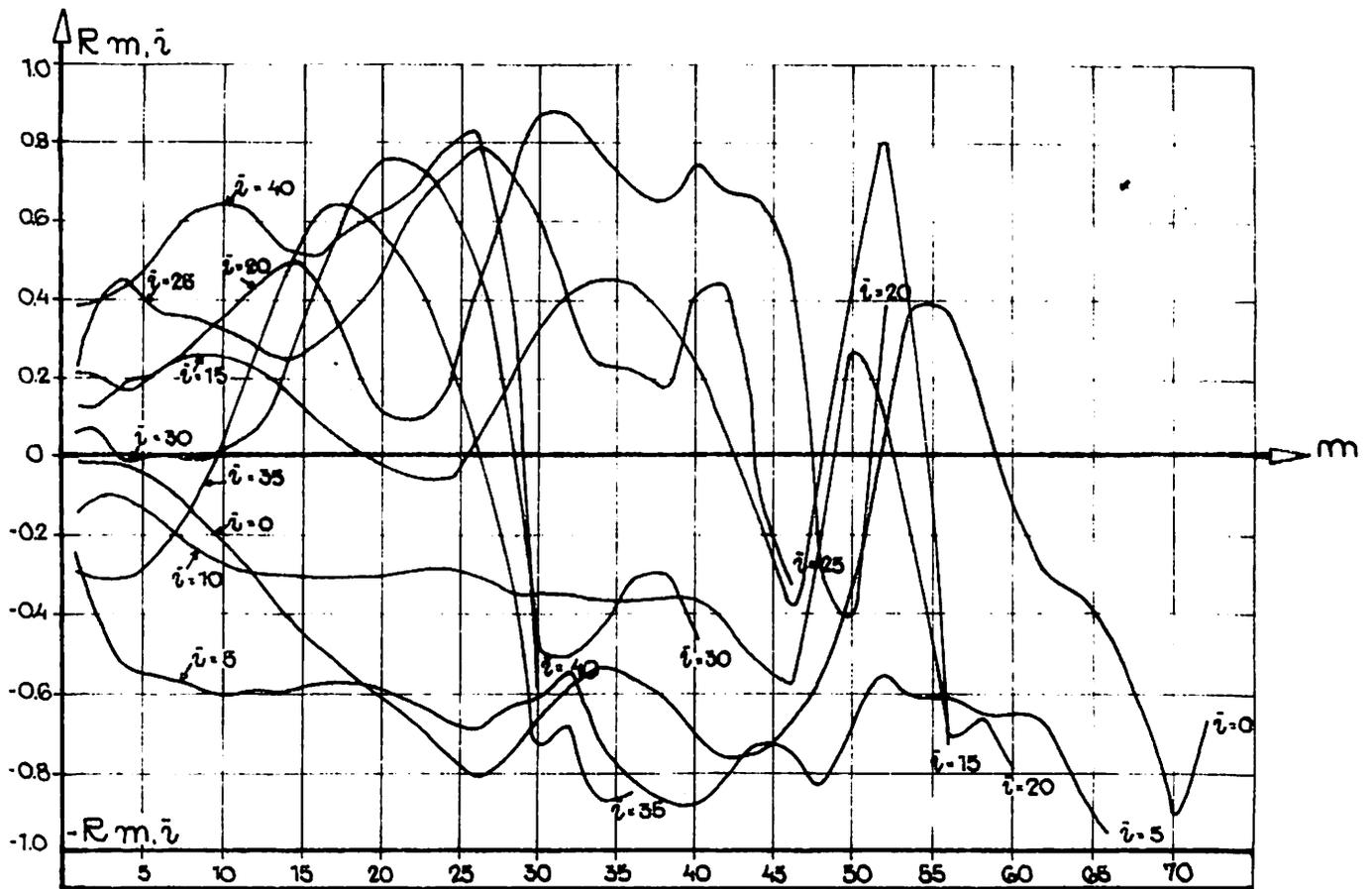


Рис. 8  $m\tau$ -коррелограммы осредненного стока р. Дунай-Оршо́ва с индексом атмосферной циркуляции Вангенгейма С

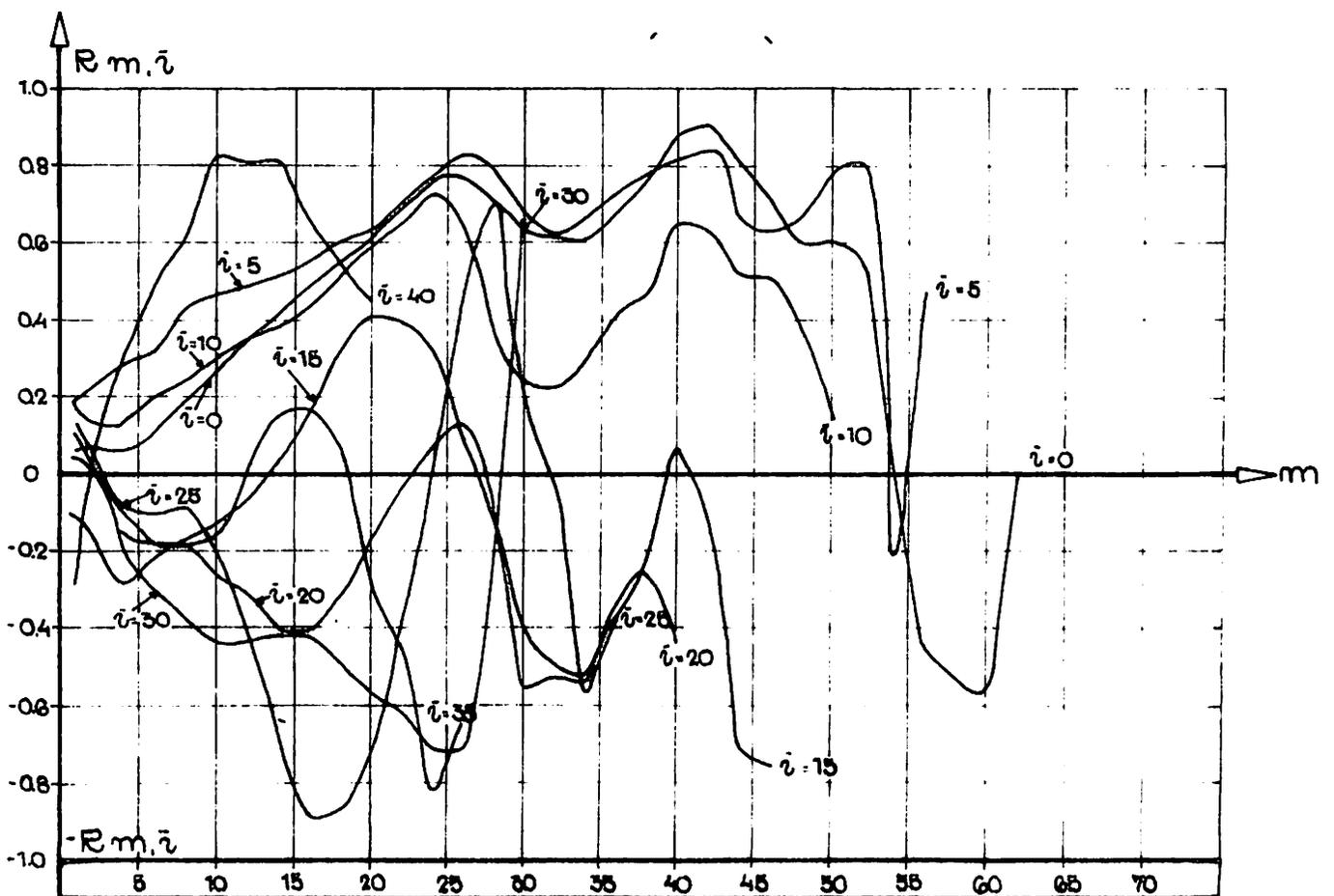


Рис. 9  $m\tau$ -коррелограммы осредненного стока р. Дунай-Оршо́ва с индексом атмосферной циркуляции Вителься

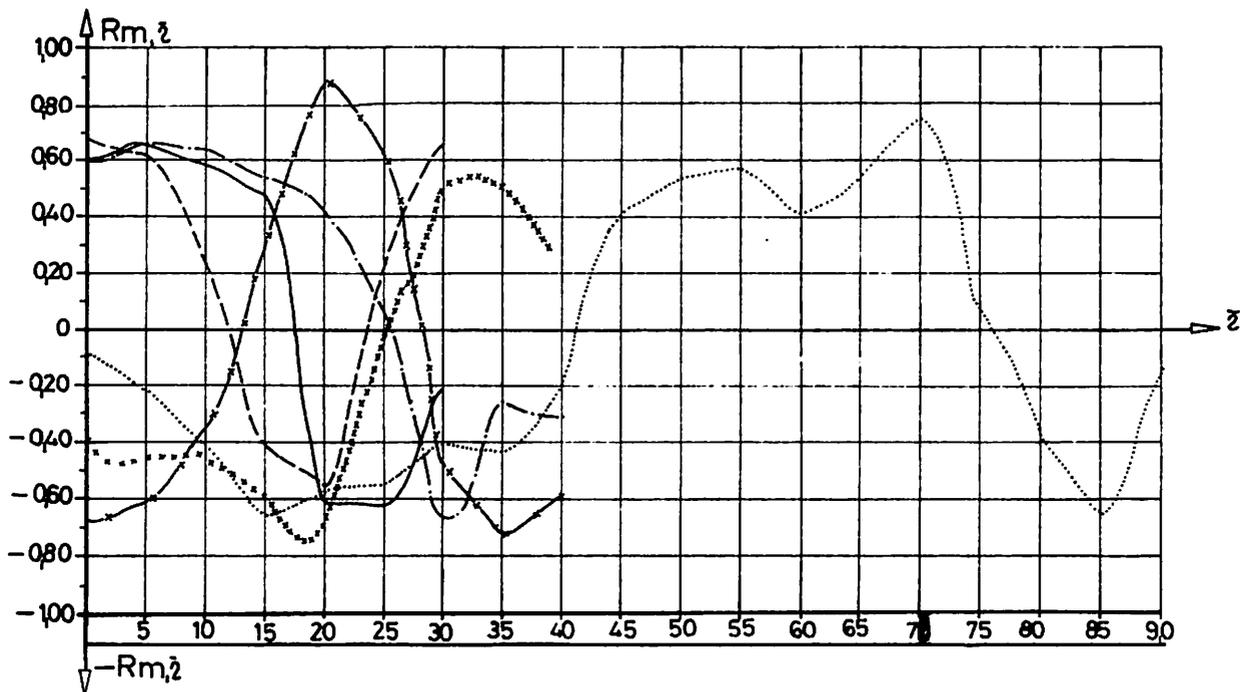


Рис. 10.  $m$  - Коррелограммы осредненного стока р. Дунай - Оршава с солнечно-атмосферными индексами, при постоянном периоде осреднения,  $m=30$  лет

Если принят на рис. 7, что  $t$  есть текущий год, то часть этой спрогнозированной величины  $\bar{Q}_{m\tau}$ , а именно  $\bar{Q}_{m-\tau}$ , см. рис. 7, к моменту  $t$  известна и соответственно прогнозу подлежит величина  $\bar{Q}_{\tau}$ . Легко увидеть, что эта последняя определяется равенством:

$$[\bar{Q}_{\tau}]_{\text{prot.}} = \frac{m}{\tau} [\bar{Q}_{m,\tau}]_{\text{prot.}} - \frac{m-\tau}{\tau} \bar{Q}_{m-\tau} \quad [13]$$

Таким образом, конечный прогноз среднего стока за  $\tau$  лет и с такой же заблаговременностью дается по прогнозу величины  $[\bar{Q}_{m,\tau}]$  и точность его зависит от двух элементов: от величины  $R_{m,\tau}$  и от соотношения  $\frac{m}{\tau}$ . Соответственно для уменьшения ошибок прогнозирования следует выбрать такие сочетания  $m$  и  $\tau$ , чтобы 1)  $R_{m,\tau} \geq 0.80$  и 2)  $m/\tau \leq 2.0$ .

Исследования по изложенной методике проводились для 9 рек Югославии (табл.) и 6 солнечно-атмосферных индексов: числа Вольфа, трех типов Вангенгейма  $W$ ,  $E$ ,  $C$  и двух индексов Вительса - антициклонического  $J_a$  и циклонического  $J_z$  (для 6-го района синоптического каталога, в который входит Югославия). Для всех рек и индексов  $m\tau$  - коррелограммы оказались главными и закономерными: величины  $R_{m\tau}$  сперва плавно возрастают с увеличением  $m$  и затем столь же плавно уменьшаются. Наибольшие  $R_{m\tau}$  наблюдаются при  $m > 10-14$  и  $\tau > 10-15$  лет. Наибольшее число ординат с  $R_{m\tau} \geq 0.80$  имеют  $m\tau$  - коррелограммы для индексов  $C$  Вангенгейма и  $J_a$  Вительса. Наименьшие ординаты и устойчивость имеют  $m\tau$  - коррелограммы для индексов  $W$  Вангенгейма и для большинства рек для индекса  $W_0$  Вольфа. Таким образом, западный перенос воздушных масс и солнечная активность в наименьшей мере сказываются на колебаниях стока большинства рек Югославии.

Максимальные значения  $R_{m\tau}$  при  $C$  и  $J_a$  достигают  $[0.90 - 0.95]$ , что открывает возможность прогнозирования по [12] и [13]. В качестве примеров в таблице 2 даются результаты проверочных независимых прогнозов осредненного стока р. Дунай - Оршава за период заблаговремен-

ности 25 лет. Разграфовки таблиц произведены в соответствии с вычислениями по равенству 13. В двух последних графах дается оценка прогнозов: абсолютная ошибка, удовлетворительные и неудовлетворительные прогнозы. В последней строке таблиц приведены параметры оценки прогнозов; допустимая ошибка ( $1/5A$ ), обеспеченность метода  $P_m$ , природная обеспеченность  $P_{пр}$  и эффективность прогнозов, т.е.  $P_m - P_{пр}$ .

Таблица 2

Независимые прогнозы осредненного стока  
р. Дунай - Оршова за период 25 лет

VI  
Индекс  $I_A$

$$\frac{m}{\tau} = 1.36$$

$$\frac{m - \tau}{\tau} = 0,36$$

$$m = 34$$

$$\tau = 25$$

$$R_{m,\tau} = -0,903$$

№	годы	$\bar{Q}_{m,пр}$	$\bar{Q}_{m-\tau}$	$\bar{Q}_{\tau, фак.}$	$\frac{m}{\tau} \bar{Q}_{m,пр}$	$\frac{m-\tau}{\tau} \bar{Q}_{m-\tau}$	$\bar{Q}_{\tau, пр}$	$\Delta \bar{Q}_{\tau}$	оценка
1	1934	5367	5270	5463	7300	1895	5405	-58	уд.
2	35	5377	5001	5499	7310	1805	5505	+6	уд.
3	36	5391	5037	5445	7310	1810	5500	+55	уд.
4	37	5403	5347	5378	7340	1920	5420	+42	уд.
5	38	5382	5491	5354	7310	1930	5380	+26	уд.
6	39	5362	5611	5328	7300	2015	5285	-43	уд.
7	1940	5404	5689	5321	7350	2040	5310	-11	уд.
8	41	5444	5987	5273	7400	21500	5250	-23	уд.
9	42	5487	6084	5268	7450	2190	5260	-8	уд.
10	43	5491	5982	5322	7460	2150	5310	-12	уд.
11	1944	5511	6191	5265	7500	2225	5275	+10	уд.
$\bar{Q} = 5404 \text{ м}^3/\text{с}$ ; $1/5^A = 78 \text{ м}^3/\text{сек}$ ; $P_m = 100.0\%$ ; $P_{пр} = 45,5\%$									

В таблице 3 представлены параметры оценки наиболее эффективных прогнозов среднего стока рек Югославии на период  $\tau$  лет по солнечно-атмосферным индексам. В графах 3-6 табл.3 приведены эффективные солнечно-атмосферные индексы, по которым велась разработка прогнозов и значения  $R_{m,\tau}$ , полученные для этих индексов при указанных в графах 4 и 5 величинах  $m$  и  $\tau$ . В следующих графах 7-11 приведены данные для прогнозирования по [13] и оценка этих прогнозов. Из этих последних данных с очевидностью следует, что результаты прогнозирования стока рек Югославии с помощью  $m\tau$  - коррелограмм позволяет сделать вывод о его обоснованности и практической эффективности. На всех реках оказалось возможным давать прогнозы среднего стока за период в 15 - 20 лет со средней обеспеченностью 94,3%.

Таблица 3

Параметры оценки прогнозов среднего стока  
на период в  $\tau$  лет по солнечно-атмосферным  
индексам

№ п/п	Река - Пункт	эфф.	m	$\tau$	$R_{m\tau}$	$m/\tau$	$\frac{m-\tau}{\tau}$	$P_m \%$	$P_{пр} \%$	$P_m P_{пр} \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.	Дунай - Оршава		34	25	-0.903	1.36	0.36	100.0	45.5	+54.5
2.	Дунай - Бездан		28	20	-0.971	1.40	0.40	86.5	45.5	+41.0
3.	Дунай - Богоево		32	25	-0.962	1.28	0.28	100.0	0	+100.0
4.	Дунай - Панчево		40	15	+0.904	2.67	1.67	67.0	44.0	+21.0
5.	Тисса - Сента		22	20	+0.920	1.10	0.10	100.0	64.3	+35.7
6.	Сава - Ср.Митров.		46	25	-0.905	1.84	0.84	95.5	77.3	+18.2
7.	Сава - Слав.Ерод		14	25	-0.923	0.56	0.44	100.0	33.3	67.7
8.	Драва-Д.Михолец		16	15	-0.925	1.07	0.067	100.0	42.0	+68.0
9.	Морава-Люб.Мост		14	20	-0.937	0.70	0.30	100.0	7.7	+98.3
среднее								94.3	40.0	54.3

#### ЛИТЕРАТУРА

- Алехин Ю.М. Статистические прогнозы в геофизике. Из-во ЛГУ - 1963.
- Догановская Л.Н. О коррелированности процессов циркуляции атмосферы и годового стока в северном и северо-восточном районах ЕГС и опыт сверхдолгосрочного прогнозирования стока. Труды ЛГМИ. вып. 35, Л.1959
- Прохаска С.И. Сверхдолгосрочные прогнозы стока рек Югославии геофизическим и динамико-статистическим методами. Диссертация на сыскание ученой степени кандидата технических наук. Ленинград, 1974.
- Шелутко В.А. Приведение стока к расчетному периоду с учетом внутренней корреляционной связи. Труды ЛГМИ, вып. 30, 1968.
- Прохаска С. Истраживања корелационих зависности средњих и малних годишњих отицања с карактеристиком процеса атмосферске циркулације и сунчане радијације и метеодика виховог прогнозирања. Водопривреда бр.13-14 Београд, 1971.
- Прохаска С. Корелациона теорија случајних функција и њена примена у хидрологији. Док.Института "Ј. Черни", Београд, 1972.
- Прохаска С., Стојановић Г. Примена кроскоррелационе теорије случајних функција при анализи процеса минималног отицања река Тисе. Саветовање о хидролошким аспектима наших вода, Будва, 1974.
- Anderson R.L. Distribution of the Serial correlation Coefficient Ann Math. Statist. 8, 1-13, 1941.

BESCHREIBUNG UND ABSCHÄTZUNG REGIONALER EINZUGSGEBIETSPARAMETER MITTELS STOCHASTISCHER VORHERSAGEMODELLE  
IM BEREICH DER DONAU

F. G. Rohde und S. A. Robinson

ОПИСАНИЕ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РЕГИОНАЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ С ПОМОЩЬЮ STOХАСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ДУНАЯ

Ф. Г. Роде и С. А. Робинзон

Zusammenfassung:

Teileinzugsgebiete der Donau im Bereich der BRD werden untersucht auf der Grundlage monatlicher Abflußdaten. Mittels durchgeführten Zeitreihenanalysen werden Aussagen getroffen über generelle statistische Struktur und stochastisch-deterministisches Verhalten der Reihen insbesondere bezüglich Periodizität, Persistenz und Langzeitverhalten nach Hurst.

Das Einzugsgebiet wird zunächst aufgefaßt als ein System, dessen Niederschlag-Abfluß (Input-Output)-Beziehung charakterisierbar ist durch Angaben wie Linearität, Zeitverzögerung, Response und Verlust. Zur Abschätzung dieser Größen werden klassische Methoden der Zeitreihenanalyse wie Kreuzkorrelation und Kreuzspektralanalyse benutzt. Mit den gewonnenen Informationen werden sogenannte Selbstgenerierende Lineare Stochastische Modelle (selfgenerating or single variable models), z.B. ARIMA-Modelle entworfen, welche nach Eichung an historischen Reihen den Abflußvorgang in einem Gebiet zumindest charakterisieren. Diese Tatsache wird benutzt in dem Versuch einer Zuordnung der gewonnenen Modellparameter zu ausgewählten Gebietsparametern, welche gebietstypische Gegebenheiten wie Geomorphologie, Vegetation, Klimazone etc. beschreiben. Für einige Teileinzugsgebiete der Donau wird versucht, die jeweils erhaltene Modellstrukturen physikalisch und regional zu deuten. So ist die bei den südlichen Donauzuflüssen ermittelte starke deterministische Modellkomponente mit ausgeprägten Hochwasserperioden im Frühling und Sommer eindeutig durch den alpinen Landschaftscharakter bedingt. Hingegen weisen die für die nördlichen Mittelgebirgs-Zuflüsse entwickelten Modelle weit stärkere stochastische Komponenten auf. Von besonderer Bedeutung ist der sog. Hurst-Koeffizient, welcher mit 0,5 für die nördlichen Donauzuflüsse auffällig niedrig ist, wogegen für die südlichen Zuflüsse sich "normale" Werte um 0,6, 0,7 ergaben. Ein Vergleich der Hurst-Koeffizienten von Donau- und Rheinzufüssen wird besprochen.

Die besprochenen selbstgenerierenden Modelle können - neben der Gebietsklassifizierung - auch in begrenztem Umfang für Vorhersagen (prediction) im Rahmen der Zeitreihensynthese benutzt werden. Ihr Vorteil ist die geringe Anzahl notwendiger Modellparameter. Da jedoch der Abflußvorgang im wesentlichen ursächlich durch den Niederschlag bestimmt wird, eignen sich zur Vorhersage besser Regressions- bzw. Übertragungsfunktions-Modelle (transfer function models). Insbesondere zum Entwurf letzterer Modelle sind die oben besprochenen Gebietsparameter von großer Bedeutung. Anwendungen von Übertragungsfunktions-Modellen auf die ausgewählten Einzugsgebiete werden beschrieben.

Резюме:

На основании месячных данных стока на территории ФРГ исследуются отдельные части бассейна реки Дунай. Посредством проведенных анализов временных рядов делаются высказывания о общей статистической структуре и о стохастическо-детерминистическом характере рядов, в особенности что касается периодичности, устойчивости и состояния длительности согласно Хурсту.

За бассейн сначала принимается система, отношение между осадками и стоком (вводом-выводом) которой характеризуется с помощью таких параметров, как линейность, временная задержка, реагирование бассейна и потеря. Для оценки этих величин используются классические методы анализов временных рядов, как взаимная корреляция и взаимно-спектральный анализ. С помощью полученной информации разрабатываются так называемые само-генерирующиеся линейные стохастические модели, например модели "Арима", которые тарирования на исторических рядах характеризуют по крайней мере явление стока в одной области. Этот факт используется в попытке осуществления сочетания полученных параметров модели с выработанными параметрами области, которые описывают типичные для отдельной области условия, как например геоморфологию, растительность, климатическую зону и др. Для некоторых частей бассейна Дуная проводится попытка физического и регионального толкования соответственно полученным структурам модели. Таким образом сильно детерминистическая составляющая модели, определенная на южных притоках Дуная, с четкими периодами паводков весной и летом обусловлена характерным ландшафтом Альпов. Напротив модели, составленные для северных притоков, расположенных в горах средней высоты, имеют более сильные стохастические составляющие. Особое значение имеет так называемый коэффициент Хурста, значение которого величиной в 0,5 необычно низко для северных притоков Дуная; в то время как для южных притоков были получены "нормальные" значения 0,6, 0,7. Также будет рассматриваться сопоставление коэффициентов Хурста как притоков Рейна так и притоков Дуная.

Nаряду с классификацией областей, рассмотренные само-генерирующиеся модели могут быть также использованы в ограниченном размере для прогнозирования в рамках синтеза временных рядов. Их преимущество заключается в незначительном количестве необходимых параметров. По существу модели регрессионных и переносных функций более пригодны для прогнозирования, так как явление стока определяется в основном осадками. Выше рассмотренные параметры имеют большое значение особенно для разработки последних моделей. Также описываются применения моделей с переносными функциями на выбранных бассейнах.

## 1. Einleitung

Geht man von der Annahme aus, daß das hydrologische Geschehen innerhalb eines Einzugsgebietes spezifischer geomorphologischer und klimatischer Struktur seinen Ausdruck findet in einer gebietsspezifischen Struktur der gemessenen Zeitreihen von Niederschlag und Abfluß, so lassen sich mit den Mitteln der Zeitreihenanalyse und der Modellsynthese statistische Größen als gebietsspezifische oder regionale Einzugsgebietsparameter definieren, welche wesentliche hydrologische Charakteristiken wie Linearität, Persistenz, Zyklizität, Determiniertheit etc. in aggregierter Form beschreiben.

Diesbezüglich untersucht werden 16 Teileinzugsgebiete der Donau im Bereich der BRD, und zwar auf den zwei Ebenen der Zeitreihenanalyse und der Modellsynthese.

Auf der Ebene der Zeitreihenanalyse werden mit klassischen Methoden wie Harmonische Analyse, Spektralanalyse, Range-Analyse etc. gebietsspezifische Parameter definiert und bezüglich ihrer Aussage diskutiert.

Auf der Ebene der Modellsynthese wird versucht, mit den im Vorangegangenen als gebietsspezifisch erkannten Parametern zur Beschreibung von mathematischen Modellen zur synthetischen Reihengeneration zu gelangen. Dabei wird unterschieden zwischen Modellen für Zwecke der Vorausberechnung (Prediction) und der Vorhersage (Forecasting). Ansätze und Ergebnisse für ARIMA-Modell, Regressionsmodelle und Übertragungsfunktions-Modelle werden diskutiert.

## 2. Zeitreihen Analyse

### 2.1 Allgemeines

Hydrologische Prozesse, insbesondere Niederschlag-Abflußvorgänge, sind darstellbar durch instationäre stochastische Zeitreihen. Regelmäßig wiederkehrende Variationen werden dabei durch deterministische Reihenkomponenten (erklärbare Variationen), alles übrige durch zufällige oder stochastische Reihenkomponenten (nicht erklärbare Variationen) beschrieben. Eine hydrologische Zeitreihe läßt sich somit auffassen als

$$Y_t = D_t + S_t \quad [1]$$

Darin ist die deterministische Komponente  $D_t$  im allgemeinen durch Trend, Zyklizität und Persistenz bestimmt. Während Trends, z.B. bei Abflußverschärfung infolge Änderung des Besiedlungsgrades, schwer nachweisbar sind, sind zyklische Variationen, insbesondere saisonale Periodizitäten, meist dominant.

Sogenannte kurzfristige Persistenz (Kurzzeitgedächtnis) über Monate wird bei Abflußreihen durch Retention erklärbar. Sogenannte langfristige Persistenz (Langzeitgedächtnis), wie beim Auftreten von regelmäßigen Sequenzen von Hoch/Niedrigwasser über Zeiträume von mehreren Jahren, ist verbunden mit dem HURST-Phänomen (1, 2).

Rein formal läßt sich eine Reihe hinsichtlich Amplituden-, Zeit- und Frequenzverhaltens mit den klassischen Methoden der statistischen Momente, der Autokorrelation sowie der Spektralanalyse untersuchen (3). Gewisse als Parameterwerte erhaltene Analyseergebnisse können bei Signifikanz als charakteristisch für die Region

gelten, aus welcher die untersuchte Zeitreihe stammt. Einige der solchermaßen als Gebietsparameter benutzten Größen werden im folgenden kurz erläutert.

Um eine Abschätzung des Anteils der deterministischen Komponente am Gesamtprozeß zu erhalten, wird zunächst eine harmonische (Fourier) Analyse der monatlichen Mittel durchgeführt.

$$Y_t = \bar{Y} + \sum_{i=1}^6 (a_i \cos \frac{2\pi i t}{12} + b_i \sin \frac{2\pi i t}{12}) \quad ; \quad \tau = 1,12 \quad [2]$$

$$\text{mit } a_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y}) \cdot \cos \frac{2\pi i t}{12} \quad ; \quad i = 1,6$$

$$b_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y}) \cdot \sin \frac{2\pi i t}{12} \quad ; \quad i = 1,6$$

Sodann wird der Anteil der deterministischen Komponente an der Gesamtvariation ermittelt zu

$$E_{xv} = \frac{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 (a_k^2 + b_k^2)}{S_y^2} \cdot 100\% \quad [3]$$

Darin stellt der Zähler die sog. erklärte Varianz dar, und  $S_y^2$  ist die Varianz der Reihe  $Y_t$ , d.h. die Gesamtvarianz.  $E_{xv}$  ist ein Parameter, der den Grad der Determiniertheit eines hydrologischen Prozesses durch saisonale Einflüsse beschreibt.

Als Gebietsparameter zur Beschreibung des Zeitverhaltens geeignet erscheinen die Werte der Autokorrelationsfunktion

$$r_k = \frac{c_k}{c_0} \quad [4]$$

$$\text{mit } c_k = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (Y_t - \bar{Y}) (Y_{t+k} - \bar{Y}).$$

Insbesondere ist  $r_1$  ein Maß für die kurzfristige Persistenz, d.h. für das Speichervermögen eines Gebietes. Das Korrelogramm  $r_k(k)$  gibt ferner Aufschluß über die Existenz etwaiger Zyklizitäten. Die Kreuzkorrelationsanalyse für Niederschlag  $X$  und Abfluß  $y$  geht dabei aus von

$$c_k = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (X_t - \bar{X}) (y_{t+k} - \bar{y}). \quad [5]$$

Zur Beurteilung der Langzeit-Persistenz nach HURST wird eine sog. R/S-Analyse (Rescaled Range) durchgeführt. Range  $R$  ist definiert als

$$R_n = \max D_1 - \min D_1. \quad [6]$$

$$\text{mit } D_1 = \sum_{i=1}^l Y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad \cdot \quad 1 < l < n$$

$R_n$  ist nach HURST die Größe des fiktiven Speichers, der konstanten Abfluß  $\bar{Y}$  garantiert. Mit  $R_n$  und der Standardabweichung  $S_n$  folgt der HURST-Koeffizient  $H$  als weiterer Gebietsparameter aus

$$\frac{R_n}{S_n} = K \cdot n^H \quad [7]$$

nach Auftragung von  $R/S = f(n)$  in doppelt-logarithmischen Koordinaten.

## 2.2 Ergebnisse

Abb. 1 zeigt das untersuchte Donaugebiet mit den Haupteinzugsgebieten und Abflußmeßstellen. Hinsichtlich Geomorphologie und Klima werden zwei unterschiedlich charakteristische Zonen unterschieden: Die linksseitigen hügeligen Einzugsgebiete (i.F. Mittelgebirgsregion genannt) und die rechtsseitigen bergigen Einzugsgebiete (i.F. Alpine Region genannt). Analysiert wurden 30-jährige Abflußreihen (1940 - 1969) und Gebietsniederschlagsreihen.

Tab. 1 enthält die für die Teileinzugsgebiete ermittelten Gebietsparameter.

	$\bar{y}$ m <sup>3</sup> /s	S. m <sup>3</sup> /s	C.	$\bar{y}$ mm	$\alpha$	% Ex.v.	$\rho 1$	G(1)	H
D2 Donau, Berg 4 002 km <sup>2</sup>	35,1	23,1	1,36	276	0,35	23,4	0,54	8,7	0,57
D4 Donau, Ingolstadt 2 001 km <sup>2</sup>	300,2	126,1	0,92	472	0,49	20,9	0,56	8,4	0,61
D5 Donau, Pfelling 37 687 km <sup>2</sup>	447,9	201,4	1,16	374	0,43	16,6	0,53	6,5	0,66
D6 Donau, Hofkirchen 47 496 km <sup>2</sup>	644,1	270,5	1,30	420	0,46	14,3	0,52	5,7	0,61
D7 Donau, Achleiten 77 000 km <sup>2</sup>	1 432	582	0,99	585	-	44,0	0,64	15,9	0,57
IL1 Iller, Kempten 953 km <sup>2</sup>	46,2	26,0	0,65	1 533	+0,84	45,8	0,55	17,0	0,45
IL2 Iller, Wiblingen 2 195 km <sup>2</sup>	67,9	32,4	0,75	1 011	+0,73	34,5	0,54	13,0	0,51
LE1 Lech, Landsberg 2 295 km <sup>2</sup>	83,3	43,0	0,93	1 142	+0,75	58,4	0,72	21,0	0,44
AL1 Altmühl, Beilngries 2 475 km <sup>2</sup>	16,8	14,2	2,11	213	0,28	25,9	0,48	9,1	0,56
NA1 Naab, Heitzenhofen 5 426 km <sup>2</sup>	48,0	32,8	1,69	278	0,37	24,0	0,54	8,6	0,67
RE1 Schw. Regen, Teisnach 627 km <sup>2</sup>	13,9	8,5	1,40	693	0,51	22,0	0,56	7,2	0,78
RE2 Regen, Regenstauf 2 658 km <sup>2</sup>	36,5	22,4	1,59	433	0,47	20,2	0,54	8,4	0,68
IS1 Isar, München PR.Br. 2 836 km <sup>2</sup>	91,3	40,6	1,57	1 013	+0,68	41,6	0,61	15,6	0,50
IS2 Isar, Plattling 8 839 km <sup>2</sup>	176,0	62,7	1,47	627	0,55	24,1	0,57	9,7	0,61
INN Inn, Passau 26 072 km <sup>2</sup>	742,0	384	1,02	896	-	72,2	0,75	25,0	0,44
ILZ Ilz, Kalteneck 762 km <sup>2</sup>	15,0	9,5	1,43	621	0,56	26,9	0,51	8,4	0,64

+ ohne Schnee

$\bar{y}$  Mittelwert (m<sup>3</sup>/s)

S. Standardabweichung (m<sup>3</sup>/s)

C. Schiefekoeffizient

$\bar{y}$  Mittelwert (mm)

$\alpha$  Abflußbeiwert

Ex.v. Erklärte-Varianz

$\rho 1$  Autokorrelation (lag 1)

G(1) Spektraldichte (1/Jahr)

H Hurst-Parameter

Tab. 1: Regionale Einzugsparameter

Abb. 2 gibt für 16 Meßstationen die jährlichen Abflußzyklen und die Standardabweichungen. Die alpinen Flüsse verhalten sich - wie zu erwarten - deutlich anders als die Mittelgebirgs-Flüsse. Bei Iller, Lech, Isar und Inn sind ausgeprägte Perioden mit Niedrig- und Hochwasser vorhanden. Altmühl, Naab und Regen sind deutlich ausgeglichener. Der Anteil der erklärten Varianz, Parameter  $E_{xy}$ , ist für die Mittelgebirgsflüsse

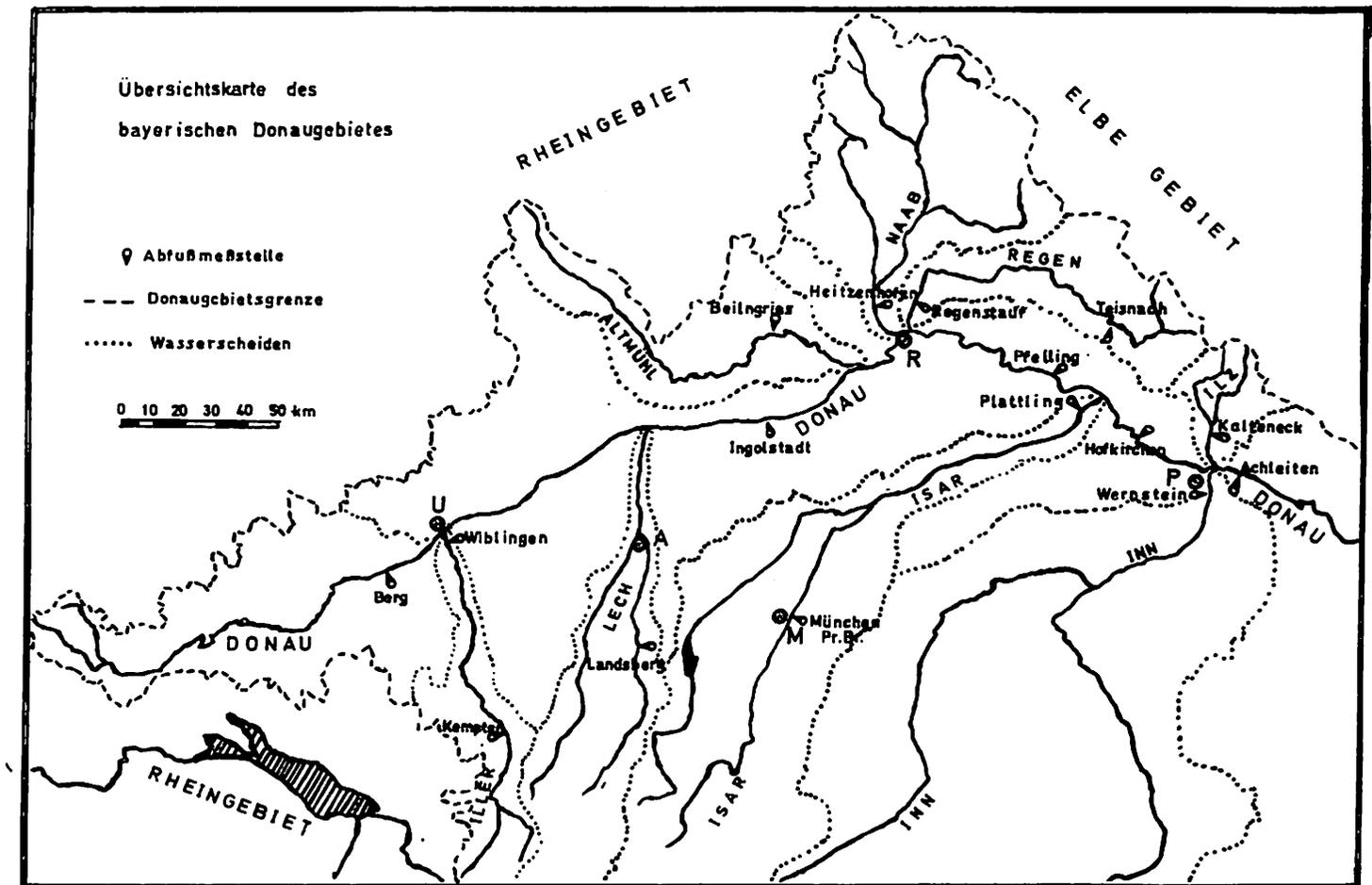


Abb. 1 : Übersichtskarte des bayerischen Donauebietes

mit 20-30 % ausgesprochen niedrig, d.h. die stochastische Komponente ist größenordnungsmäßig 3-4 mal so stark wie die deterministische Komponente. Ganz anders verhalten sich die alpinen Flüsse, bei denen  $E_{xv}$  immerhin zwischen 40-70 % liegt. Bei Iller bzw. Isar fällt der deutliche Rückgang von  $E_{xv}$  mit der Änderung des geomorphologischen Charakters von Kempten nach Wiblingen bzw. von München nach Plattling zusammen.

Bis München hat das Isartal Hochgebirgs- bis voralpinen Charakter ( $E_{xv} = 41,6 \%$ ). Von München nach Plattling durchquert der Fluß die breite Münchener Schotterebene der Isar-Lech-Platte, die mit ihren stark durchlässigen glazialen Sedimenten einen komplexen Grundwasserspeicher darstellt, der die deterministischen Einflüsse des alpinen Zuflusses weitgehend dämpft. Dies geschieht nicht beim Inn, der seinen hochgradig deterministischen Charakter ( $E_{xv} = 72 \%$ ) bis zur Mündung in die Donau beibehält.

Der Autokorrelationskoeffizient  $r_1$ , als Maß für Kurzzeit-Persistenz, zeigt zwar höhere Werte für die alpinen Gebiete, erscheint jedoch insgesamt als wenig informativ.

Die letzte Spalte der Tab. 1 enthält die ermittelten HURST-Parameter,  $H$ , mit Werten von 0,4 - 0,7. Es fällt auf, daß alle Mittelgebirgsflüsse  $H > 0,5$  und alle alpinen Flüsse  $H \leq 0,5$  aufweisen. Zur Interpretation dieser Ergebnisse sei ein kurzer Hinweis auf die grundlegenden Arbeiten von HURST, MANDELROT und WALLIS gestattet. Danach bedeutet

- $H = 0,5$  das Vorliegen eines zeitinvarianten Zufallprozesses (White NOISE-Process) ohne Persistenz.
- $H > 0,5$  das sog. HURST-Phänomen, bei Vorhandensein von signifikanter Langzeit-Persistenz (Langzeitgedächtnis)
- $H < 0,5$  das Vorliegen eines sich selbst steuernden Prozesses. Bei  $H = 0$  ist Range = Standardabweichung.

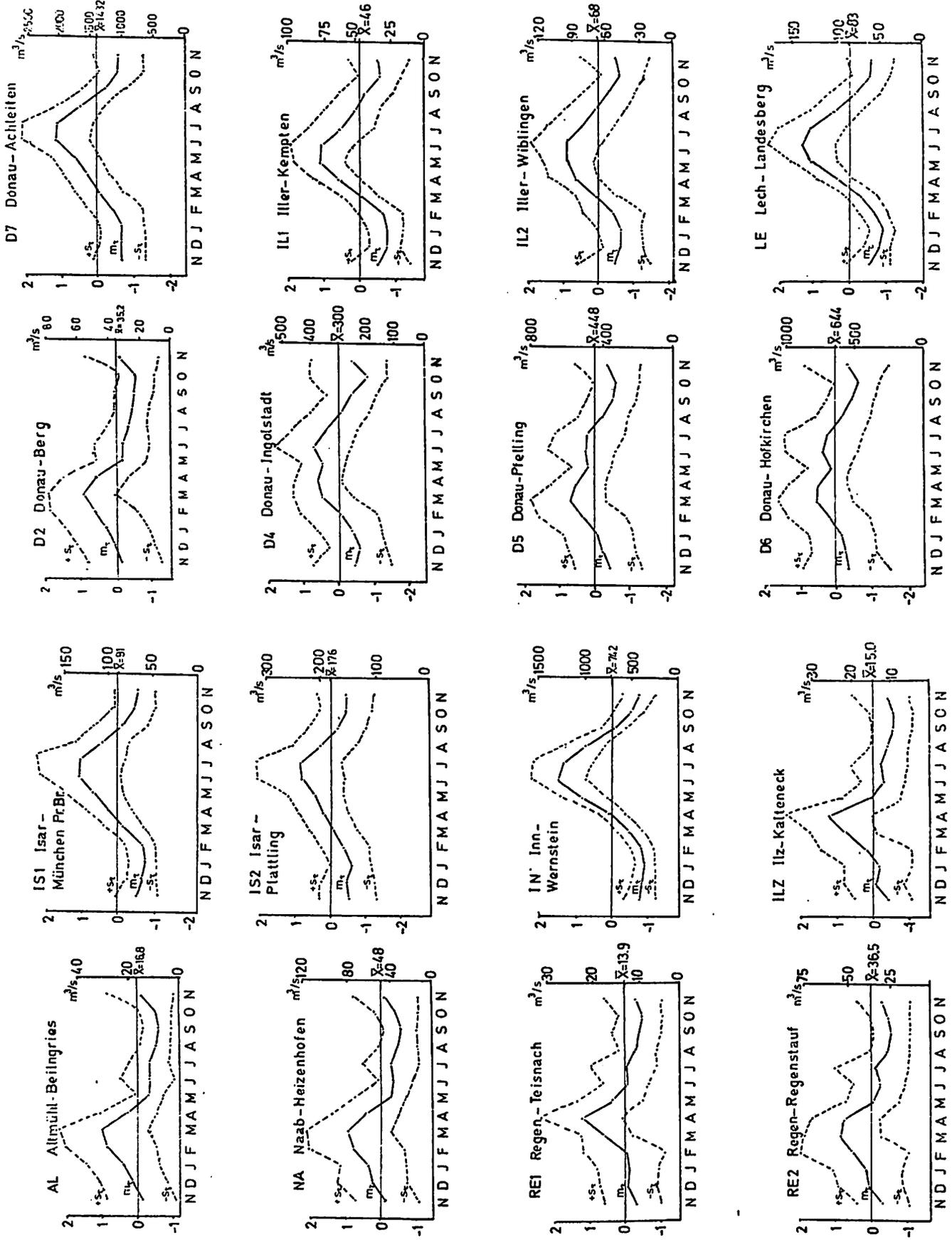


Abb. 2

Für geophysikalische Zeitreihen werden in der Literatur H-Werte angegeben, die in der Regel deutlich über 0,5 liegen und damit auf physikalisch nicht erklärbare Langzeit-Persistenzen hinweisen. Für Abflußreihen liegt danach H im Mittel bei etwa 0,7. Werte um 0,5 oder darunter sind hingegen nur sehr selten nachweisbar. So empfanden Mandelbrot und Wallis, 1969, die Tatsache, daß der Rhein bei Basel für monatliche Abflußwerte  $H = 0,55$  und für jährliche Abflußwerte  $H = 0,5$  aufweist, als "seltenes Beispiel" und bezeichneten den Rhein daraufhin als einen ausgesprochen gutartigen ("nice river") Fluß.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen nun, daß sich die Mittelgebirgsflüsse mit  $H > 0,5$  in obigem Sinn "normal" verhalten. Die alpinen Zuflüsse hingegen zeigen mit H-Werten, die teilweise deutlich unter 0,5 liegen, ein grundsätzlich anderes Verhalten. Vergleicht man diese Zuflüsse mit dem Rhein bei Basel, so liegt die Vermutung nahe, daß hier gleiche oder ähnliche klimatische und geophysikalische Bedingungen das Fehlen des HURST-Phänomens bewirken könnten, insbesondere mit Rücksicht darauf, daß das obere Rheintal den alpinen Einzugsgebieten unmittelbar benachbart ist und das Gebiet bei Basel deutlich alpinen Charakter hat. Ferner ist ein gewisser Zusammenhang zwischen H und der erklärbaren Varianz  $E_{xv}$  zu vermuten. Mit abnehmenden Werten für  $E_{xv}$  treten größere Werte für H ein. Dies trifft auch für die Einzugsgebiete von Regen und Ilz im Bayrischen Wald zu, welche bei überraschend niedrigem deterministischen Anteil  $E_{xv}$  die höchsten HURST-Parameter aufweisen.

### 3. Modell-Synthese

#### 3.1 Allgemeines

Für Zwecke der synthetischen Erzeugung von Reihen (prediction) oder der Vorhersage (forecasting) von Einzelereignissen kommen allgemein drei Modelltypen zur Anwendung

- Selbstgenerierende Lineare Stochastische Modelle
- Modelle mit Multipler Regression
- Übertragungsfunktions-Modelle

Modellwahl und -identifikation für die untersuchten Abflußgebiete wird im Folgenden diskutiert auf der Grundlage der in Kapitel 2.2 beschriebenen Gebietscharakteristika.

#### 3.2 Selbstgenerierende Lineare Stochastische Modelle

Modelle dieses Typs (z.B. Markov-Modelle, ARIMA-Modelle), gelegentlich auch als "Single-Variable"-Modelle bezeichnet, eignen sich besonders für die Reihensynthese (prediction). Die weiteren Ausführungen beziehen sich auf die Anwendung eines speziellen Modelltyps (Roesner und Yevjevich, 1966) auf den Donaupegel Berg.

Zunächst wird die als instationär zu betrachtende historische Abflußreihe  $Y_t$  durch die Transformation

$$Z_t = \frac{\bar{Y}_t - Y_t}{S_t} \quad [8]$$

mit monatlichen Mittelwerten  $\bar{Y}_t$  und Standardabweichung  $S_t$  saisonbereinigt. Für  $Z_t$  wird sodann ein Autoregressions-Modell (AR [1]), d.h. ein Markov-Modell mit Zeitverschiebung 1, angenommen.

$$Z_t = \vartheta_1 \cdot Z_{t-1} + (1 - \vartheta_1)^{1/2} \varepsilon_t \quad [9]$$

mit  $\vartheta$  = Autokorrelationskoeffizient der Z-Reihe und  $\varepsilon_t$  = Gammaverteilte Zufallsgröße mit Mittelwert 0 und Abweichung 1. Mit [9] und einem beliebigen Anfangswert  $Z_0$  wird eine beliebig lange synthetische Reihe  $Z_t$  rekursiv generiert, aus der schließlich durch Rücktransformation die entsprechende synthetische Abflußreihe folgt

$$\bar{Y}_t = \bar{Y}_t + S_t \cdot Z_t \quad [10]$$

Gleichung [9] und [10] beschreiben das 25-parametrische Modell ( $12 \times \bar{Y}_t$ ,  $12 \times S_t$ ,  $1 \times \theta_1$ ). Die damit für den Pegel Berg generierte Reihe ist in Abb. 3 dargestellt. Die statistischen Parameter, monatliche  $\bar{Y}$  und  $S$ , dieser Reihe stimmen voraussetzungsgemäß mit denen der historischen Reihe überein. Der historische Parameter von 0,57 (Tab. 1) kann hingegen nicht nachgebildet werden. Modelle mit "kurzem Gedächtnis" wie Markov-Modelle, Thomas-Fiering-Modelle etc. zeigen definitionsgemäß keine Langzeitpersistenz und haben damit den theoretischen HURST-Wert 0,5. Der untersuchte Modelltyp eignet sich somit für die alpinen Abflüsse nur bedingt. Hier könnten gegebenenfalls sogenannte "Fractional Noise"-Modelle vorgeschlagen werden. Abgesehen von der noch nicht abgeschlossenen Diskussion über den Sinn derartiger Modelle, sei auf den damit verbundenen sehr erheblichen Rechenaufwand hingewiesen.

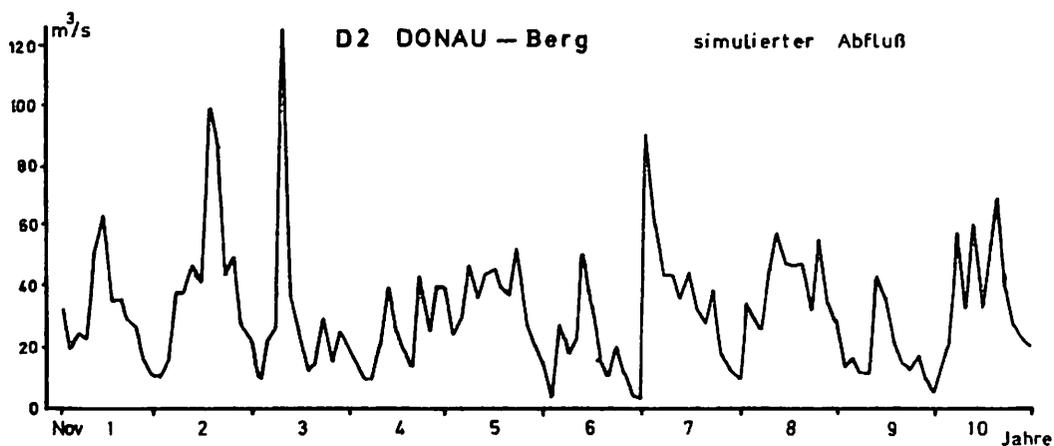


Abb. 3: Donau-Pegel Berg, Abflußreihe generiert mit Linearem Selbstgenerierendem Modell (Markov-M.)

### 3.3 Modelle mit multipler Regression

Zum Zweck der Vorhersage eignen sich vorbeschriebene Modelle nur für Abflußvorgänge, die einen starken Autokorrelationsanteil ( $r_1 > 0,7$ ) bei großer Erklärter Varianz ( $E_{XV} > 70\%$ ) aufweisen. Das trifft im Untersuchungsgebiet lediglich für den Inn bei Passau sowie vermutlich für einzelne kleinere alpine Einzugsgebiete zu.

Für Vorhersagezwecke besser geeignet erscheinen Modelle auf der Basis Multipler Regression des Typs

$$Y_t = a_0 + \sum_{k=1}^n a_k X_k + \epsilon_t \quad [11]$$

bei denen die  $n$  unabhängigen Variablen  $X_k$  außer vergangenen Abflüssen unbeschränkt viele andere abflußbeeinflussende Vorgänge beschreiben können. So bestimmt MERKL, 1974 (5) monatliche Abflüsse aus Gebietsniederschlag, Grundwasserständen und Lufttemperatur, BENSON und MATALAS, 1967 (6) berücksichtigen weitere geographische und landwirtschaftliche Parameter, und JENSEN, 1973 (7) gibt für alpine Einzugsgebiete der Donau ein Prognosemodell der Form

$$Q_{4,7} = a_0 + a_1 N_{10,3} + a_2 Q_{10,3} + a_3 W_3 + a_4 V_3 + a_5 N_{4,7} + \epsilon \quad [12]$$

mit

- $Q_{4,7}$  = kumulierter Abfluß der Monate April bis Juli
- $N_{10,3}$  = kumulierter Niederschlag der vorangehenden Wintermonate
- $Q_{10,3}$  = Winterabfluß

$W_3$	=	Wasseräquivalent der Schneedecke am 31. März
$V_3$	=	Volumen der Seen des betreffenden Einzugsgebietes am 31. März
$N_{4,7}$	=	Niederschlag der Vorhersageperiode

Regressionsmodelle des obigen Typs sind zwar einfach in der Anwendung, haben jedoch den wesentlichen Nachteil, daß der Auswahl der Einflußparameter eine gewisse Willkür anhaftet, da sie in der Regel nach statistischen und nicht nach physikalischen Gesichtspunkten zu treffen ist. Modelle dieses Typs wurden deshalb im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht aufgestellt.

### 3.4 Obtragungsfunktions-Modelle

Sehr zweckmäßig erscheint die Benutzung von sogenannten Übertragungsfunktions-Modellen (transfer-function-models), die bei stärkerer Berücksichtigung physikalischer Gegebenheiten sowohl für Vorhersagezwecke wie für die Zeitreihensynthese anwendbar sind.

Ausgegangen wird von der Vorstellung des Einzugsgebietes als einer BLACK-BOX, deren physikalisch-dynamisches Verhalten durch weitgehend bekannte hydrologische Vorgänge wie Speicherung, Verluste, Translation etc. bestimmt ist. Als Systemeingang wurde zunächst nur der Gebietsniederschlag  $X_t$  berücksichtigt, aus dem sich der Systemausgang, Abfluß  $Y_t$ , durch lineare Filterung (Faltung) ergibt zu

$$Y(t) = \int_0^t h(\tau) \cdot X(t-\tau) \cdot d\tau + \epsilon_t \quad [13]$$

Darin ist  $h(\tau)$  die Übertragungsfunktion. In diskreter Schreibweise und Darstellung von  $h(\tau) \cdot d\tau$  durch Gewichte  $V_\tau$  folgt

$$Y_t = \sum_{\tau=0}^m V_\tau \cdot X_{t-\tau} + \epsilon_t \quad [14]$$

Diese Transformation wurde zunächst unmittelbar auf die oben beschriebenen Systemeingänge und -ausgänge angewendet. Wegen der damit verbundenen Vernachlässigung der Einflüsse aus Abfluß- bzw. Niederschlagsaufteilung in effektive und nicht effektive Anteile wurde es jedoch bei den weiteren Untersuchungen notwendig, vor der Faltung nach [14] noch eine Transformation gemäß

$$\hat{X}_t = \frac{X_t - \bar{X}_t}{S_{Xt}}, \quad \hat{Y}_t = \frac{Y_t - \bar{Y}_t}{S_{Yt}} \quad [15]$$

durchzuführen. Mit dieser Saisonbereinigung konnten obige Einflüsse teilweise, insbesondere saisonale Verdunstungsanteile, berücksichtigt werden. Kreuzkorrelations- und Spektralanalyse der saisonbereinigten Reihen zeigte befriedigende lineare Abhängigkeit.

Zur Bestimmung der Übertragungs- bzw. Gewichtsfunktion  $V_k$  wurden zwei unterschiedliche Methoden angewendet:

- Methode der Kleinsten Quadrate (Least-squares-fit)
- "Pre-Whitening" der Input-Reihe, d.h. Entfernung des autokorrelativen Anteils und Parameteroptimierung für minimale Standardabweichung der Residuen gemäß

$$S_\epsilon^2 \rightarrow \text{MIN} \quad [16]$$

mit  $\epsilon_t = \hat{Y}_t - \sum_k V_k \cdot \hat{X}_{t-k}$

(Nonlinear-Least-squares-fit)

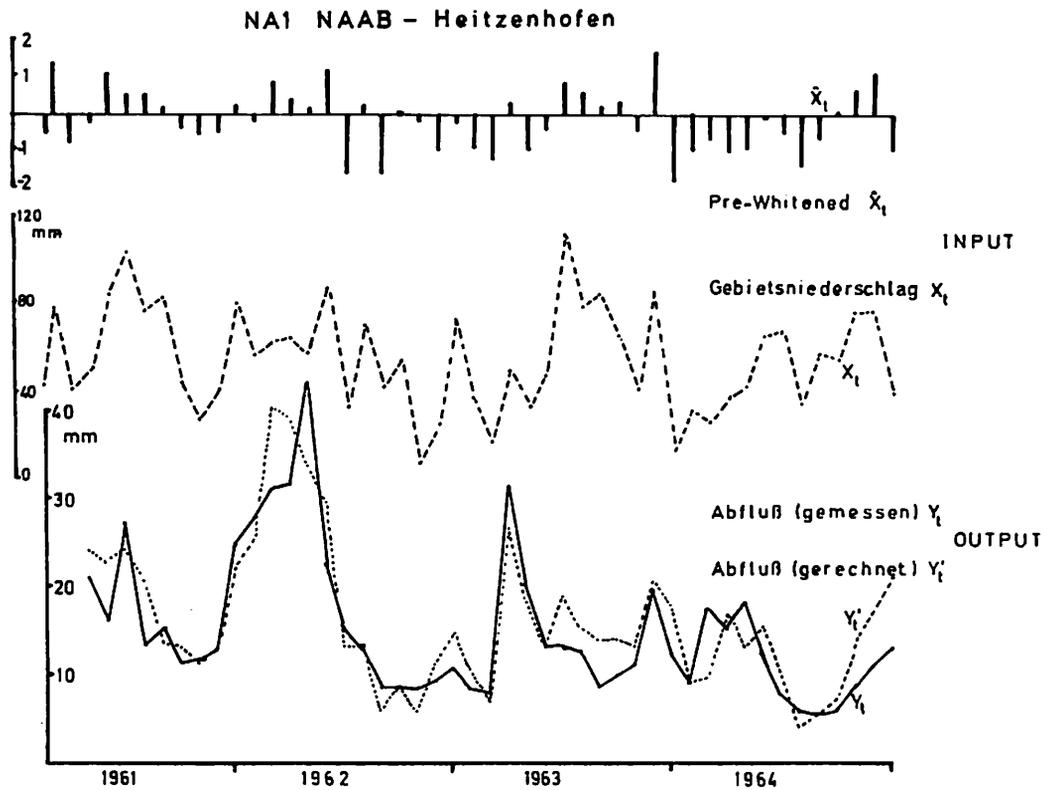


Abb. 4 : Naab-Pegel Heitzenhofen, historischer Abfluß und generiert mit Übertragungsfunktions-Modell

Abb. 4 zeigt die Ergebnisse des Übertragungsfunktionsmodell für den Abfluß der Naab bei Heitzenhofen. Die Übereinstimmung von gemessenem und berechnetem Abfluß ist gut. In Tab. 2 sind die zugrunde gelegten Modellparameter angegeben.

Gewichte (Opt. Methode 1)	Autoregress. Parameter (pre-whitened)	Gewichte (Opt. Methode 2)	ARIMA-Parameter (Residuen-M.)
$v_0 = 0,485$ $v_1 = 0,382$ $v_2 = 0,258$ $v_3 = 0,167$	$\phi_x = 0,07$	$v_0 = 0,645$ $v_1 = 0,365$ $v_2 = 0,229$ $v_3 = 0,113$	$\phi_\epsilon = 0,24$
$R = 0,799$		$R = 0,884$	

R = Korrelationskoeffizient;  $R^2$  = Bestimmtheitswert

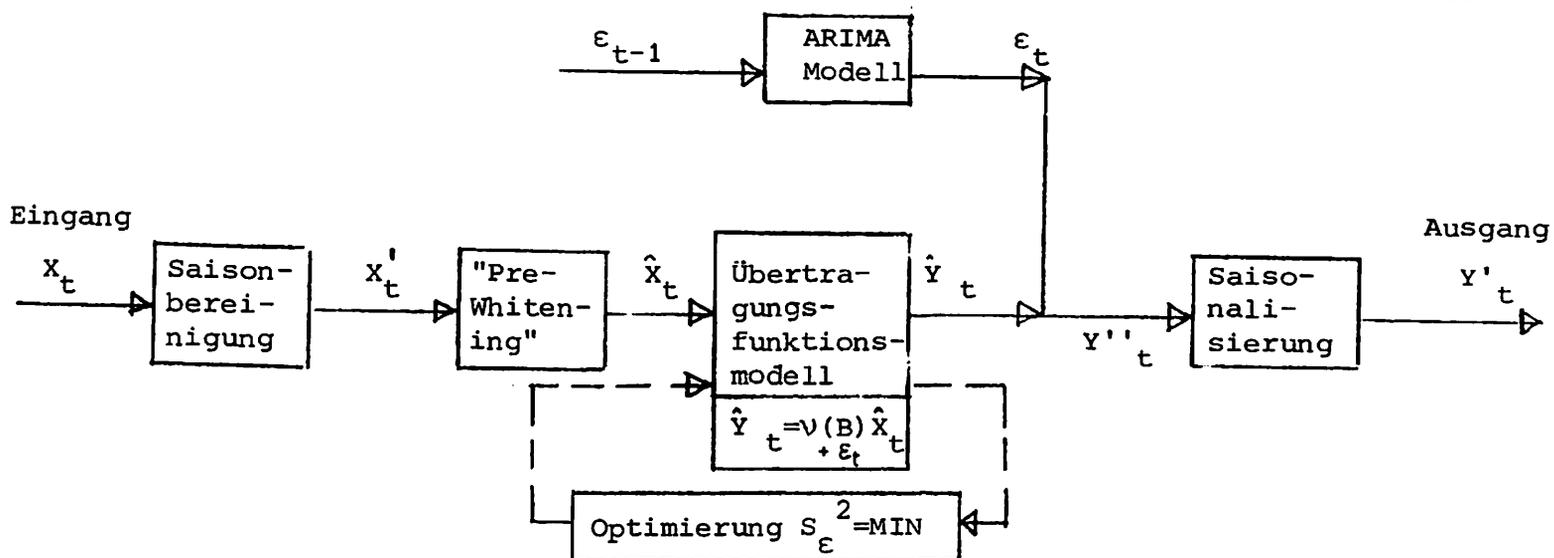
Tab. 2 : Parameter der Niederschlag-Abfluß-Übertragungsfunktion für die Naab bei Heitzenhofen

Einige im weiteren Verlauf der Untersuchungen vorgesehene Entwicklungen seien noch erwähnt. Falls die Reihe der Residuen noch signifikante Autokorrelation aufweist, ist eine Modellverbesserung durch nachträgliche Anpassung eines ARIMA-Modells vorgesehen. Damit ergibt sich eine Gesamtmodellstruktur wie in Abb. 5 dargestellt.

Als weitere sehr wichtige Verbesserung ist vorgesehen, die Übertragungsfunktion zeitvariant in Abhängigkeit von saisonalen Schwankungen der Bodenfeuchte anzunehmen, sowie die Berücksichtigung von Evapotranspiration im Rahmen eines Verlustmodells.

Im alpinen Raum ist der Einfluß der Schneeschmelze  $Z_t$  von größter Bedeutung. Zur expliziten Berücksichtigung als zweiten Eingang ist das Modell zu erweitern auf

$$Y_t = \sum v_k \cdot X_{t-k} + \sum w_k \cdot Z_{t-k}$$



X = Niederschlag

Y = Abfluß

$\varepsilon$  = Stochast. Komponente

Abb. 5: Gesamtstruktur des Übertragungsfunktions-Modells

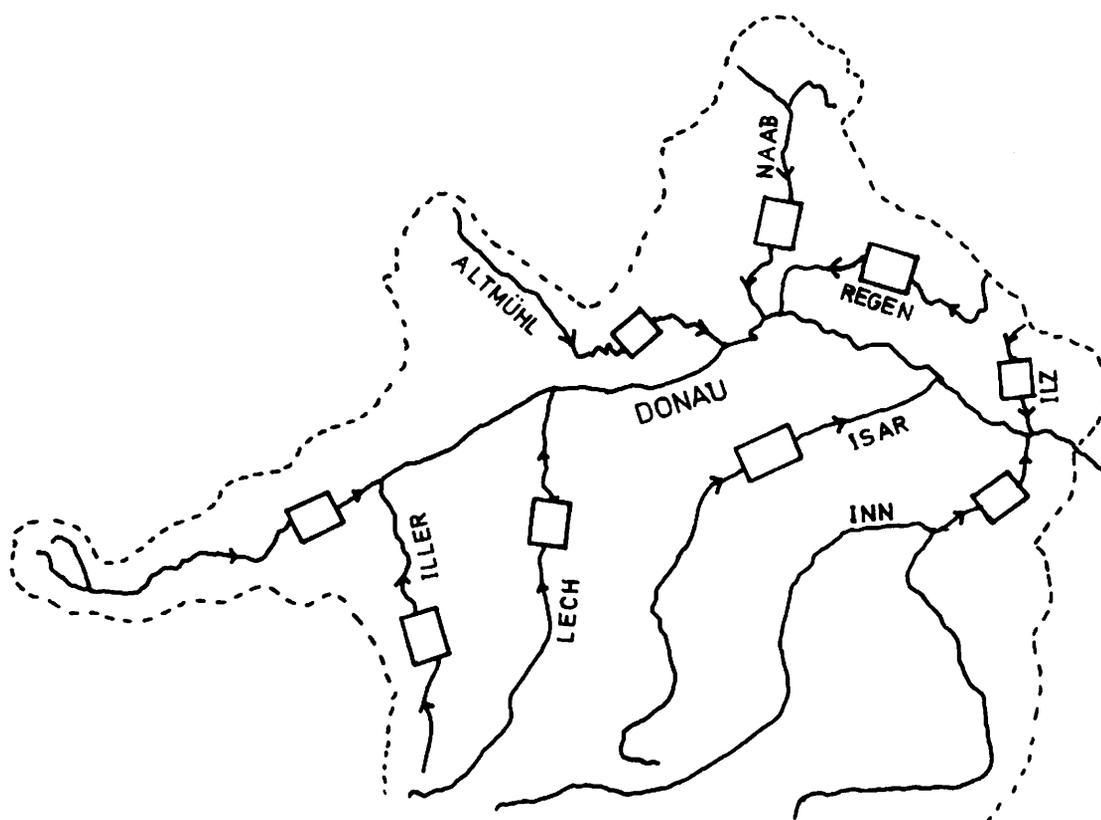


Abb. 6: Gesamtsystem

Ferner sind große Einzugsgebiete weiter aufzulösen in Teilgebiete möglichst homogener Gebiets- und Klimastruktur.

#### 4. Zusammenfassung

Für Einzugsgebiete der Donau im Bereich der BRD wurden Abflußreihen auf monatlicher Basis analysiert bzw. mit mathematischen Modellen generiert. Dabei zeigt sich ein grundsätzlich unterschiedliches Verhalten der Zuflüsse aus dem alpinen bzw. Mittelgebirgsregionen. Bei ersteren ist  $H \leq 0,5$ . Gleichzeitig ist der Anteil der Erklärten Varianz d.h. die Determiniertheit der alpinen Abflüsse deutlich höher. Ein inverser Zusammenhang zwischen dem Betrag für den HURST-Parameter und der Erklärten Varianz ist qualitativ feststellbar. Die Iller- und Isar-Abflüsse sind für je 2 Pegel analysiert worden. In beiden Fällen läßt sich die Abnahme der Determiniertheit erklären durch geomorphologische Gegebenheiten.

Verschiedene mathematische Modellansätze für Zwecke der Zeitreihensynthese und Abflußvorhersage werden diskutiert. Auf die Vorteile von Übertragungsfunktionsmodellen wird hingewiesen und über Anwendungserfahrungen und -ergebnisse berichtet.

#### L i t e r a t u r h i n w e i s e:

1. Hurst, M.E.,  
Black, R.P.,  
Simaika, Y.M. "Long Term Storage" - An Experimental Study -  
Constable, London 1965
2. Mandelbrot, B.B.,  
Wallis, J.R. "Noah, Joseph and operational hydrology"  
Water Resources, Research, 4 (5), S. 909 - 918, 1968
3. Plate, E. "Analyse kontinuierlicher Zufallsfunktion"  
Mitteilung des Instituts für Wasserbau III, Universität Karlsruhe,  
H.1, 1971
4. Roesener, L.A.,  
Yevjevich, V.M. "Mathematical models for time series of monthly precipitation and  
monthly runoff"  
Hydrology papers, Colorado State University, Fort Collins, 1966
5. Merkl, G. "Zur Prognose der mittleren monatlichen Wasserführung von Flüssen"  
Österreichische Wasserwirtschaft, Jg. 26, H. 7/8, 1974
6. Benson, M.A.  
Matalas, N.C. "Synthetic Hydrology Based on Regional Statistical Parameters"  
Water Resources Research, 3 (4), S. 931 - 935, 1967
7. Jensen, H. "Anwendung der Regressionsanalyse"  
Hydrologische Prognosen für die Wasserwirtschaft, Nr. 12, Mittei-  
lung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie,  
ETH Zürich, 1974

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ АНАЛИЗЕ  
ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗЕ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ НА РЕКАХ ЕВРОПЫ

Делеур М.С., Ворожбитов И.И., Панкратова Е.И.

VERWERTUNG VON SATELLITENINFORMATIONEN FÜR ANALYSE UND VORHER-  
SAGE VON FRÜHJAHRSHOCHWÄSSERN AUF DEN FLOSSEN EUROPAS

Deleur M.S., Vorožbitov I.I., Pankratova E.I.

Резюме

Доклад посвящен вопросам использования спутниковой информации при анализе формирования и прогнозе весеннего половодья на реках Европы.

Дается методика построения карт снежного покрова в весенний период по данным телевизионных съемок с искусственных спутников Земли.

Представлены примеры применения телевизионных и инфракрасных снимков для определения площадей одновременного снеготаяния в целях гидрологического прогнозирования. Получены зависимости продолжительности половодья от продолжительности снеготаяния на открытых равнинных водосборах, облесенных менее чем на 40%. Даты начала снеготаяния определены по данным инфракрасных съемок, даты конца снеготаяния или схода снега с поверхности водосбора по телевизионным снимкам с ИСЗ. Для контроля и подтверждения полученных по снимкам с ИСЗ площадей одновременного снеготаяния использованы данные наземных наблюдений.

Zusammenfassung

Der Beitrag wird den Fragen der Ausnutzung der Information durch Satelliten bei der Analyse der Bildung und der Vorhersage der Frühjahrschneeschmelze auf den Flüssen in Europa gewidmet.

Es wird die Methodik der Kartierung der Schneedecke im Frühling nach den Angaben der Fernsehaufnahmen künstlicher Satelliten beschrieben.

Es werden Beispiele der Anwendung von Fernseh- und infraroten Aufnahmen für die Ermittlung von Flächen der gleichzeitigen Schneeschmelze für Zwecke der hydrologischen Vorhersage angeführt. Es wird die Abhängigkeit der Hochwasserdauer von der Dauer der Schneeschmelze auf den offenen flachen Abflussgebieten, die weniger als 40% bewaldet sind, festgestellt. Die Anfangsdaten der Schneeschmelze werden nach den Angaben der infraroten Aufnahmen und die schneefreie Fläche des Abflussgebietes nach den Fernsehaufnahmen künstlicher Satelliten bestimmt. Für die Kontrolle und Bestätigung der durch Satelliten festgestellten Flächen gleichzeitiger Schneeschmelze werden die Angaben der Bodenbeobachtungen verwendet.

В настоящее время все более актуальным становится вопрос использования спутниковой информации для изучения природных ресурсов Земли и, в частности, для исследования гидрологических процессов. Космическая информация, обладая пространственно-временной информативностью, позволяет изучать обширные территории речных бассейнов, озер и морей, динамику водных масс, степень их загрязненности, определять причинно-следственные связи гидрологических явлений.

Наиболее успешно спутниковая информация, в частности снимки, сделанные в видимой (ТВ) и в инфракрасной (ИК) областях спектра, используется гидрологами СССР и других стран в целях картирования снежного покрова в горах (6, 7, 8, 9, 11) и на равнине (1, 8, 10), для изучения ледяного покрова на крупных озерах, водохранилищах и морях (5, 7, 10, 11), при определении гидрографических и гидрологических характеристик.

В Советском Союзе рассмотрены перспективы научных исследований в области космической гидрологии, определены пути и направления этих исследований, разработана программа изучения процесса формирования стока на основе дистанционного зондирования и указаны возможности создания принципиально новой системы составления прогнозов различных видов стока с использованием комплексных данных наземных наблюдений и аэрокосмических съемок (2).

Реализация данной программы позволит не только качественно улучшить анализ многих гидрологических процессов, но и установить новые количественные показатели, а также перейти к разработке более совершенных схем гидрологических прогнозов.

Руководствуясь программой исследований, составленной член-корреспондентом АН СССР Г.П.Калининым (2), были произведены научные разработки, в которых показана возможность использования спутниковых данных для изучения снежного покрова на равнинной территории в целях гидрологического прогнозирования.

Разработки произведены для рек бассейна Волги по материалам, полученным по телевизионному каналу с ИСЗ "Метеор" за весенние периоды 1971-1973 гг. Установленные по этим данным дешифровочные признаки снежного покрова были использованы при анализе условий формирования талого стока рек бассейна Дуная.

Искусственные спутники Земли системы "Метеор" имеют круговую орбиту, высота которой около 900 км, период обращения 101 - 102 мин, угол наклона орбиты к плоскости экватора  $81^{\circ}$ . Эти спутники производят ТВ покадровую съемку в дневное время суток двумя камерами. Полоса захвата на местности около 1 400 км вдоль орбиты спутника. Кроме того, со спутников "Метеор" производятся съемки сканированием в инфракрасной области спектра в диапазоне длин волн 8 - 12 мкм. Захват полосы около 1 600 км. Съемки в инфракрасной области спектра производятся в дневное и ночное время суток.

Разрешение телевизионной аппаратуры составляет 1,5 x 1,5 км в надире. Разрешение инфракрасной аппаратуры составляет 20 x 20 км в надире.

Телевизионные снимки фиксируют облачный покров и крупные элементы ландшафта, наиболее хорошо опознаваемые в период залегания снежного покрова и при отсутствии облачности. Инфракрасная съемка фиксирует излучательные характеристики различных природных образований.

Одной из задач комплексного использования данных, получаемых со спутников, является разработка принципов и приемов дешифрирования снимков. Однако использование космических снимков затрудняется тем, что каждый отдельный снимок имеет значительные ( $15-30^{\circ}$ ) углы наклона. Кроме того, даже при исключении наклона, трансформированное изображение получается в косоугольной перспективной проекции с полюсом в точке надире этого снимка. Это препятствует непосредственному сравнению контуров на разных космических снимках, а также - на космическом снимке и карте. Устранить этот недостаток можно путем преобразования космических снимков в фотокарты, на которых местность воспроизводится с большей полнотой, чем на обычных картах, что дает возможность повысить эффективность как общегеографического, так и специального изучения территории. Основными путями решения задачи являются: оптико-механический, аналитический и аналоговый. В Государственном гидрологическом институте для составления фотокарт по фототелевизионным снимкам системы "Метеор" был применен оптико-механический способ. Он позволяет составлять фотокарты в заданной картографической проекции с точностью, ограниченной лишь электронными погрешностями снимков и, в отличие от аналитического и аналогового способов, не требует разработки специальной аппаратуры и приборов.

Составление фотокарт начинается с подготовки математической основы: выбор, вычисление и построение картографической сетки, отождествление и нанеска на основу трансформированных точек, вычисление элементов трансформирования. Затем на обычных фототрансформаторах производится трансформирование снимков, по которым составляется фотокарта. Критерием оценки точности составления фотокарт являются средние квадратические ошибки отклонения трансформационных точек относительно соответственных точек основы. Для фотокарт масштаба 1:5 000 000, составленных в прямой конической равнопромежуточной проекции по телевизионным снимкам системы "Метеор" на территорию, расположенную между Скандинавией и Черным морем, ошибки не превы-

шают  $\pm 1,2$  мм. Сравнение контуров на отдельных участках трансформированного изображения происходит с точностью  $\pm 0,5$  мм в масштабе изображения.

Таким образом, при разработке темы были использованы фотокарты, составленные по трансформированным телевизионным снимкам; фотосхемы, составленные из нетрансформированных снимков и снимки инфракрасных съемок. По этим материалам были определены дешифровочные признаки снежного покрова.

Характерной особенностью снега является его высокая отражательная способность, выражающаяся спектральным ( $\tau_{\lambda}$ ) и интегральным ( $\tau$ ) коэффициентами отражения. Как показано в работе (3), свежеснеженный, чистый, сухой снег имеет в видимой области спектра высокий коэффициент отражения, колеблющийся в пределах 0,88 - 0,95 в зависимости от длины волны. Наибольший коэффициент отражения снега наблюдается при длине волны 0,612 мкм, причем для чистого, сухого снега он равен 0,95, для тающего, старого (покрытость снегом 20%)  $\tau_{\lambda} = 0,29$ .

Коэффициент отражения снега является величиной изменчивой, которая зависит от целого ряда факторов. К первой группе факторов можно отнести различия в спектральном составе солнечной радиации и влияние высоты Солнца, а ко второй группе - изменения в структуре и плотности снега, его влажности и степени загрязненности. Однако изменения величин ( $\tau_{\lambda}$ ) под влиянием различий в спектральном составе солнечной радиации, поступающей на поверхность снега, и высоты Солнца небольшие и колеблются в пределах  $\pm 0,05$ . Более значительные вариации коэффициента отражения обусловлены изменениями структуры снежного покрова, увеличением плотности и влажности снега, степени загрязненности поверхности снега.

Таким образом, можно отметить, что снег обладает достаточно высоким коэффициентом отражения и лишь в самом конце снеготаяния величина его заметно снижается. Однако в весенний период определить границу, разделяющую тающий, влажный снег от сухого, вполне возможно. Влажный снежный покров, имеющий температуру  $0^{\circ}$  и выше, является более теплой поверхностью, чем снег неотающий, температура поверхности которого отрицательная. Поэтому поля тающего влажного снега изображаются на ИК снимках более темным тоном, чем поля сухого снега. Вообще, как отмечают некоторые исследователи (12), значительный контраст в отражении тающего и сухого снега наблюдается при длинах волн 1,5 мкм, т.к. слой воды на поверхности снега в 1 см и более полностью поглощает ИК радиацию. Даже при толщине слоя воды в 1 мм наблюдается значительное поглощение ИК радиации.

Благодаря своим высоким отражательным свойствам, снег виден на спутниковых снимках с момента его выпадения и до конца снеготаяния, когда на полях остается около 20% снега. Однако тон и текстура изображения полей снежного покрова различны и зависят от условий телевизионной съемки и режима проявления пленки, а также от изменений физического состояния снега. Снежный покров на равнинной безлесной местности в зависимости от его толщины и состояния изображается на ТВ снимках белым цветом различной тональности и очень часто является демаскирующим признаком речной сети. В свою очередь речная сеть помогает выявить наличие снежного покрова на местности. На равнинных территориях, покрытых лесами, снежный покров обнаруживается по отдельным пятнам открытых местностей среди серых и темносерых тонов растительности. Снежный покров на пересеченной всхолмленной местности и в горах распределяется неравномерно и на фотографиях представляется в виде пятен различной конфигурации и площади, что зависит от степени пересеченности территории и перепада высот местности. Важным демаскирующим признаком является контур изображения объектов земной поверхности. Например, в зимний период весьма четко выделяется заснеженная суша на темном фоне воды при отсутствии льдов.

Используя приемы дешифрирования и различия ТВ снимков по тону и текстуре изображения под-

стиляющей поверхности при отсутствии облачности, а также учитывая отражательные свойства снега, были определены 7 градаций состояния снежного покрова. Градации 1-3 характеризуют снежный покров на открытой и залесенной территориях при сплошном его покрытии. Градации 4-7 получены для различных состояний снежного покрова и покрытости территории снегом (табл.1). Используя качественные характеристики снежного покрова, получены соответствующие каждой градации количественные значения высоты снега и запаса воды в снежном покрове (рис.1 ).

Для построения зависимостей на рис.1 использованы данные пентадных и декадных снегосъемок 51 станции и поста за 5/III-72 г., 50 - за 20/III-72 г., 55 - за 15/IV-72 г., 35 - за 20/IV-72 г. и соответствующие этим датам данные ТВ съемок со спутника "Метеор".

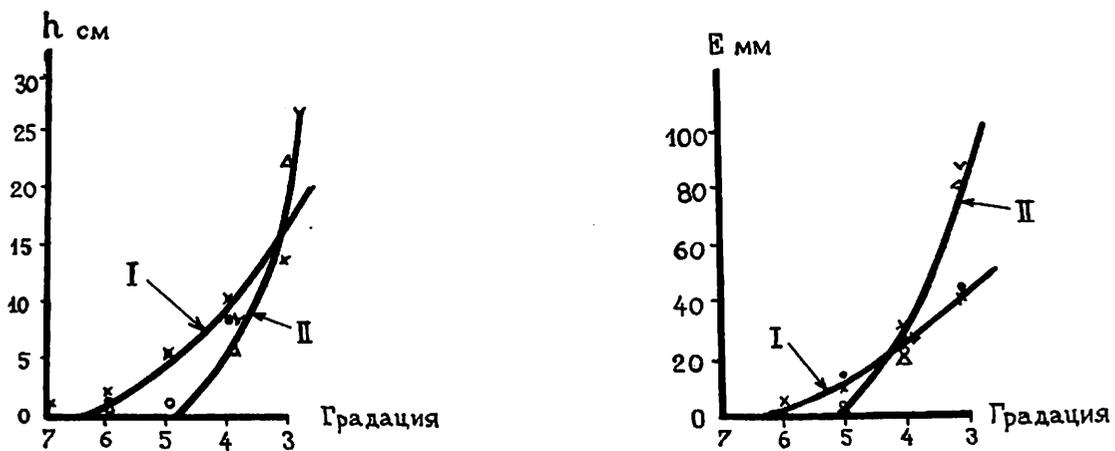


Рис.1 Значения высоты снежного покрова ( $h$ ), запаса воды в снеге ( $E$ ) для различного состояния снежного покрова в период таяния, определенного по ТВ снимкам и выраженного в условных единицах (градации по табл.1).

Условные обозначения:

• - 5.III-72, x - 15.III-72, o - 20.III-72, Δ - 15.IV-72, v - 20.IV.72.

I - степная зона, II - лесная зона.

Типизация снежного покрова может производиться визуальным и инструментальным методами. При инструментальной обработке космифотоснимков значения высот снега, степени покрытия участка снегом оцениваются коэффициентами пропускания света через негатив или по плотности изображения, затем производится статистический анализ получаемых величин. При автоматической обработке спутниковых данных необходимо производить строгий сенситометрический контроль.

Совместный анализ ТВ и ИК снимков позволяет картировать снежный покров: устанавливать положение линий фронта и тыла снеготаяния. Линия фронта снеготаяния представляет собой границу, разделяющую тающий снежный покров и сухой. Она устанавливается по различию тонов изображения талого и сухого снега на ИК снимках, показывающих температурные контрасты. Точность проведения линии фронта снеготаяния составляет  $\pm 50$  км. Линия тыла снеготаяния представляет собой границу схода снега, разделяющую на ТВ снимке тоновые контрасты. Обычно более

Таблица 1

Градации снежного покрова на ТВ снимках по тону и текстуре изображения (визуальная оценка)

Гра- да- ция	Тон и текстура изображения	Состояние снежного покрова
1.	Белый. Трудно отделить облачность от снега.	Свежевыпавший, сухой, однородный (залегает на открытых незалесенных пространствах)
2.	Белый с темными пятнами залесенной территории.	Свежевыпавший, сухой, неоднородный (залегает на открытых, частично залесенных пространствах)
3.	Светло-серый, с вкраплениями более светлых пятен, где снег чистый и только начал таять, и более темных пятен, где снег тает несколько интенсивнее.	Снег в период таяния, влажный, без проталин. Растаяло, примерно, $0,95 E_{\max}^*$ , покрытость территории 100%.
4.	Серый, с вкраплениями темных пятен (до 30%), но незначительных по размеру.	Снег в период таяния, влажный, с проталинами. Растаяло от $0,95 E_{\max}$ до $0,75 E_{\max}$ ; покрытость снегом 75-95%.
5.	Темно-серый, чередование различных по яркости светлых и темных пятен. Те и другие пятна занимают от 30 до 60% площади.	Снег в период таяния, мокрый. Проталины, растаяло от $0,75 E_{\max}$ до $0,25 E_{\max}$ . Покрытость снегом в среднем 50%.
6.	Темный, с редким вкраплением светлых пятен снега.	Снега осталось менее $0,25 E_{\max}$ . Покрытость снегом около 25%.
7.	Тон почти черный. Снег виден на возвышенностях и в руслах рек.	Снег сошел. Покрытость снегом 5-10%.

\* $E_{\max}$  - запас воды в снежном покрове к началу снеготаяния.

светлому тону соответствует высота снега 5-10 см и выше, запас воды в снеге более 10 мм, покрытость территории снегом более 20%. Менее светлому тону (темно-серому) соответствует высота снега < 5 см и покрытость снегом < 20%. При четко обозначенной границе раздела двух тонов точность проведения линии тыла снеготаяния на ТВ снимке составляет 0,3-0,5 мм или 3-5 км в масштабе съемки. При нечетком рисунке схода снега провести изолинию труднее и ошибки могут возрасти до 10-20 км.

Территория, находящаяся между линиями фронта и тыла снеготаяния, называется площадью одновременного снеготаяния. Она является важным фактором максимального весеннего стока, от нее зависит высота и форма волны половодья. Площадь одновременного снеготаяния является величиной изменчивой, которая зависит от скорости продвижения линий фронта и тыла снеготаяния. По изменению этой площади можно судить о величине убыли снеготаяния. На рис.2 приведена зависимость площади одновременного снеготаяния (в долях) от относительной величины убыли снеготаяния на данной площади ( $K_E$ ), определенной по формуле:

$$K_E = \frac{E_{\max} - E_i}{E_{\max}} \quad [1]$$

где  $E_{\max}$  - максимальные запасы воды в снеге на водосборе перед началом снеготаяния (мм),  
 $E_i$  - запас воды в снеге в период снеготаяния (мм).

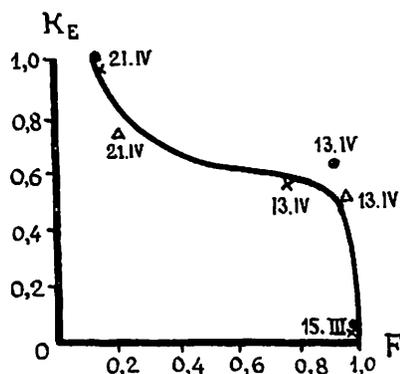


Рис.2 Зависимость относительной величины убыли снеготаяния ( $K_E$ ) от площади, занятой снежным покровом ( $F$ ). Весна 1972 г. Условные обозначения:  
 • - р.Унжа, × - р.Ветлуга,  
 △ - р.Вятка.

Рис.2 получен по данным анализа процесса снеготаяния на трех водосборах - р.Унжа, р.Ветлуга, р.Вятка за 15 марта, 13 апреля и 21 апреля 1972 г. Снеготаяние 15 марта еще не началось, поэтому  $F = 1$  и  $K_E = 0$ .

Связь на рис.2 дает возможность найти по площади одновременного снеготаяния, определяемой по данным ТВ и ИК съемок, относительную величину убыли снеготаяния на день съемки с ИСЗ, что является важным при составлении и уточнении краткосрочных прогнозов стока. Аналогичные зависимости могут быть получены по любым другим водосборам и, в частности, для бассейна Дуная.

По положению линии схода снега можно определить скорость ее движения, используя которую, а также сведения о начале снеготаяния по среднесуточной температуре воздуха или по данным ИК съемок, легко вычислить общую продолжительность снеготаяния на водосборе [1].

Продолжительность снеготаяния является одной из характеристик весеннего половодья. На рис. 3 представлена зависимость продолжительности половодья на реках бассейна р. Волги, залесенных менее 50% (Ока-Калуга, Ока-Касимов, Ока-Горбатово, Цна-Княжево, Мокша-Шевелевский Майдан, Клязьма-Ковров, Сура-Княжиха), от продолжительности снеготаяния, определенной по ТВ снимкам с "Метеора". Приведено две линии связи: одна получена за период от даты начала подъема половодья до даты максимального расхода воды и другая линия - за весь период половодья.

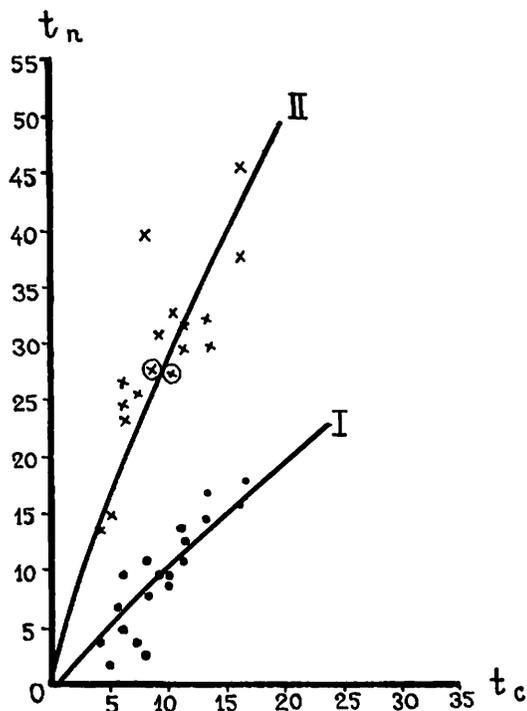


Рис. 3 Зависимость продолжительности половодья на реках бассейна Волги от продолжительности снеготаяния за 1971-1973 гг.  
 I - продолжительность половодья от даты начала подъема до даты максимального расхода воды,  
 II - общая продолжительность половодья.

Первая линия связи имеет коэффициент корреляции равный 0,87, вторая - 0,79. По критериям, принятым в практике гидрологических прогнозов, связь [I] является хорошей, связь [II] - удовлетворительной. Данные связи могут быть использованы при гидрологических расчетах и прогнозах. Для предсказания продолжительности половодья необходимо предвычислить продолжительность весеннего снеготаяния.

Зависимости, подобные приведенным выше, могут быть получены также для бассейна р. Дуная. Самые крупные притоки Дуная - Драва, Сава, Морава, Тиса, Прут - берут начало в горах. Сток этих рек, а также р. Дуная у Будапешта, формируется за счет таяния снега и выпадения дождей. Однако в редкие годы снежный покров удерживается в бассейнах рек всю зиму. Чаще всего в результате оттепелей и относительно раннего весеннего снеготаяния снег быстро сходит на равнинных участках водосборов и дальше сохраняется только в горах. При таянии снега часто выпадают дожди, которые способствуют сходу снега. На ТВ снимках в зимне-весенние периоды довольно часто может видеть облачность. Она имеет обычно нечеткие, размытые границы, что позволяет отличить ее от подстилающей поверхности. Облачность верхнего и среднего ярусов в виде серой пелены или волокон, через которые видны элементы ландшафта и выделяются области аккумуляции снега. Картирование снежного покрова в бассейне р. Дуная при отсутствии облачности значительно облегчается дендритовым рисунком изображения, четким выделением цепи гор - Альп, Динарских гор, Балкан, Карпат - и прилегающих к ним возвышенностей.

По результатам съемок со спутника "Метеор" в 1969-72 гг. удалось проследить динамику образования и схода снежного покрова на равнине и в горах. Получив из Гидрологических ежегодников (р. Дунай, Дунайская комиссия, Будапешт) температуру воздуха, была определена по ТВ снимкам продолжительность схода снежного покрова. Получены, аналогично рис. 3, связи продолжительности снеготаяния с продолжительностью половодья, они выражаются степенными функциями, первого вида:

$$t_{\text{полов.}} = 1,5 t_{\text{сн}}^{0,9} \quad [2]$$

второго вида  $t_{\text{полов.}} = 16 t_{\text{сн}}^{0,9} \quad [3]$

где  $t_{\text{полов.}}$  - продолжительность половодья,  $t_{\text{сн}}$  - продолжительность снеготаяния.

Материалы со спутника "Метеор" дают возможность проследить изменение высоты снеговой линии в Альпах. Но так как эти исследования ведутся в Швейцарии, ФРГ и других странах (8, 9, 11), мы не останавливаемся на этом вопросе.

Таким образом, ТВ снимки со спутника "Метеор" дают дополнительную к наземным и достаточно большую информацию о состоянии снежного покрова в период снеготаяния и формирования половодья. Характеристики снежного покрова, полученные по спутниковым данным, хорошо увязываются с гидрологическими показателями, что является важным при составлении прогнозов стока.

Как показали результаты исследований, изображения подстилающей поверхности с ИСЗ "Метеор" позволяют производить визуальное дешифрирование и картирование снежного покрова на значительной территории. Однако в настоящее время широко применяются статистические методы анализа, разрабатываются математические модели преобразования и интерпретации космических снимков, создается аппаратура для автоматизации обработки получаемой спутниковой информации.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Делеур М.С.,  
Ворожбитов И.И.,  
Панкратова Е.И. Анализ формирования весеннего половодья на реках бассейна Волги по данным ТВ снимков со спутника "Метеор". - Тр. ГГИ, вып. 237 (в печати).
2. Калинин Г.П. От аэрокосмических снимков к прогнозам и расчетам стока. 1974, Л., Гидрометеиздат, 41 с.
3. Кузьмин П.П. Физические свойства снежного покрова. 1957, Гидрометеиздат, Л., 179 с.
4. Куприянов В.В.,  
Прокачева В.Г. Использование спутниковой информации для гидрологических целей. - Метеорология и гидрология, 1973, № 10, с. 87-93.

5. Прокачева В.Г. Возможность картирования ледовой обстановки на крупных озерах по снимкам с искусственных спутников Земли. - Метеорология и Гидрология, 1973, № 9, с. 48-55.
6. Темников С.Н. Некоторые вопросы использования спутниковой информации для изучения снежного покрова. - Тр. СарНИГМИ, вып. 65 (80), 1972, с. 138-149.
7. Темников С.Н. О возможности использования спутниковых фотографий при картировании снежного и ледяного покрова. - Океанология, 1973, № 3, т.ХШ, Изд-во "Наука", М., с. 517-523.
8. Barnes I.C., Bowley C.I. Snow cover distribution as mapped from satellite photography. - "Water Resources Research", 1968, vol. 4, N 2, p. 257-272.
9. Ferguson H.I., Cork H.F., O'Neill A.D.I. Applications of satellite photography to hydrology in Canada. - "Proc. of NRC Hydrology Symposium" N 7, National Research Council of Canada, Victoria, B.C., 1969, p. 311-343.
10. Itten K. The determinations of snowlines from weather satellite pictures. - "Transactions of the 3rd. Int.Symp. of Photo-Interpretation", Dresden, 1970, vol.XVIII, p. 455-464.
11. Kaminski H. Eis und Schnee in Satellitenphotos. - "Umschau in Wissenschaft und Technik", 1970, H.6, S. 163-169.
12. Strong A.E., McClain E.P., McGinnis D.F. Detection of thawing snow and ice packs through the combined use of visible and near-infrared measurements from Earth satellites. - "Monthly Weather Review", 1971, vol. 99, N 11, p. 828-830.



ПРОГНОЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ПРОЕКТИРУЕМЫХ  
ГИДРОУЗЛОВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ДУНАЙ

Сванидзе Г.Г.

LANGFRISTIGE ABFLUSSPROGNOSEN FÜR DIE BEUR-  
TEILUNG GEPLANTER STAUSTUFEN (IM EINZUGSGEBEIT DER DONAU)

Svanidze G.G.

Резюме

Существующие методы прогноза речного стока применимы для эксплуатируемых гидроузлов. При проектировании новых установок необходимо иметь вероятностный прогноз условий их работы на 5-10-20 и более лет. Для выполнения водохозяйственных расчетов предлагается применение ансамбля условных реализаций процесса стока в виде гидрологических рядов, смоделированных методом Монте-Карло. Внутригодовое распределение учитывается путем применения неравно-дискретной модели стока.

Zusammenfassung

Die vorhandenen Methoden der Abflußvorhersage sind hauptsächlich für den Betrieb von Staustufen anwendbar. Bei Projektierung von Neuanlagen ist es notwendig, deren Betriebsverhältnisse für eine bedeutend längere Periode (von 5 bis 10, 20 und mehr Jahren) vorherzusagen. Zur Lösung dieser Aufgabe wird im Vortrag vorgeschlagen, die Berechnungen nach dem Gesamtbild der relativen Realisierungen des Abflußprozesses als hydrologische Reihen durchzuführen, die im Hinblick auf die Jahresverteilung des Abflusses modelliert sind. Dazu benutzt man die Theorie der Zufallsfunktionen und die Methode der statistischen Prüfungen (Monte-Carlo) in Verbindung mit den Verfahren der wasserwirtschaftlichen Berechnungen, die mittels EDV ausgeführt werden.

При проектировании гидроузлов с водохранилищами сезонно-годового и многолетнего регулирования для выбора оптимальных параметров установки, определения будущего режима работы и оценки ее эффективности необходимо проведение водохозяйственных расчетов, которые, естественно, носят прогностический характер. Для такого сверхдолгосрочного прогноза гидрологическая основа может быть получена лишь в вероятностной форме, поскольку однозначный (детерминированный) прогноз речного стока на несколько (5-10-20 и более) лет вперед нельзя получить ни в настоящее время, ни в будущем из-за чрезвычайного множества действующих факторов и стохастической природы обуславливающих сток геофизических процессов. Отмечанные положения являются очевидными, однако, до настоящего времени водохозяйственные (водноэнергетические) расчеты в проектных организациях выполняются главным образом календарным методом, т.е. водобалансовые расчеты будущих режимов установки проводятся непосредственно по наблюдаемым в прошлом гидрологическим рядам. Несмотря на удобство и исключительную наглядность этого метода, он должен быть отклонен поскольку в будущем никогда больше в точности не повторится уже наблюдаемое чередование водности различных лет и сезонов.

Вместе с тем достаточно с высокой степенью надежности предполагается, что при прочих равных условиях, в основном без изменения сохраняются имеющиеся статистические закономерности процесса стока. На этом предположении и основываются существующие аналитические и статистические методы описания и вероятностного предвидения возможных колебаний стока в будущем.

Из существующих методов теории регулирования речного стока наиболее простыми и удобными для применения на практике являются способы статистического моделирования искусственных условных реализаций гидрологических рядов методом Монте-Карло с последующим проведением с их помощью водохозяйственных расчетов и построением функций распределений выходных характеристик (например, выработки электроэнергии, располагаемых мощностей и холостых сбросов воды на гидроэлектростанциях, отдачи воды для орошения или водоснабжения, наполне-

ний регулирующих водохранилищ и т.д.).

К настоящему времени предложены несколько математических моделей, учитывающих стохастические связи прогнозируемой функции (предиктанта) от исходных аргументов (предикторов), какими могут быть объема стока за предшествующий период. Например, в работах (4, 9) предложено ансамбль условных реализаций процесса колебания годовых величин стока моделировать по схеме сложной цепи Маркова с помощью унифицированного метода. Внутригодовое распределение стока может быть учтено путем применения метода фрагментов [1].

Здесь рассмотрим другой метод, основанный на применении неравнодисcretной модели стока. Преимущество этой модели заключается в том, что она позволяет нестационарный процесс стока приводить к стационарной случайной последовательности (2, 8). Для краткости она условно названа "Т моделью", а сам процесс приведения "Т преобразованием". Суть последнего заключается в следующем.

Принимая процесс речного стока периодическим случайным процессом с периодом в один год, по всем наблюдаемым в расчетном створе гидрографам строим осредненный (т.н. фиктивный) гидрограф, представляющий собой оценку математического ожидания данного процесса (рис.1). Площадь, ограниченная этой кривой и осями координат, по величине равна среднему многолетнему стоку (норме)  $\bar{W}$ . Ось времени делим на заданное число  $N = 10-20$  интервалов  $\Delta_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ), в пределах которых объемы среднего стока будут равными, т.е.

$$S_j = \frac{\bar{W}}{N} = \bar{S} = \text{const.} \quad [1]$$

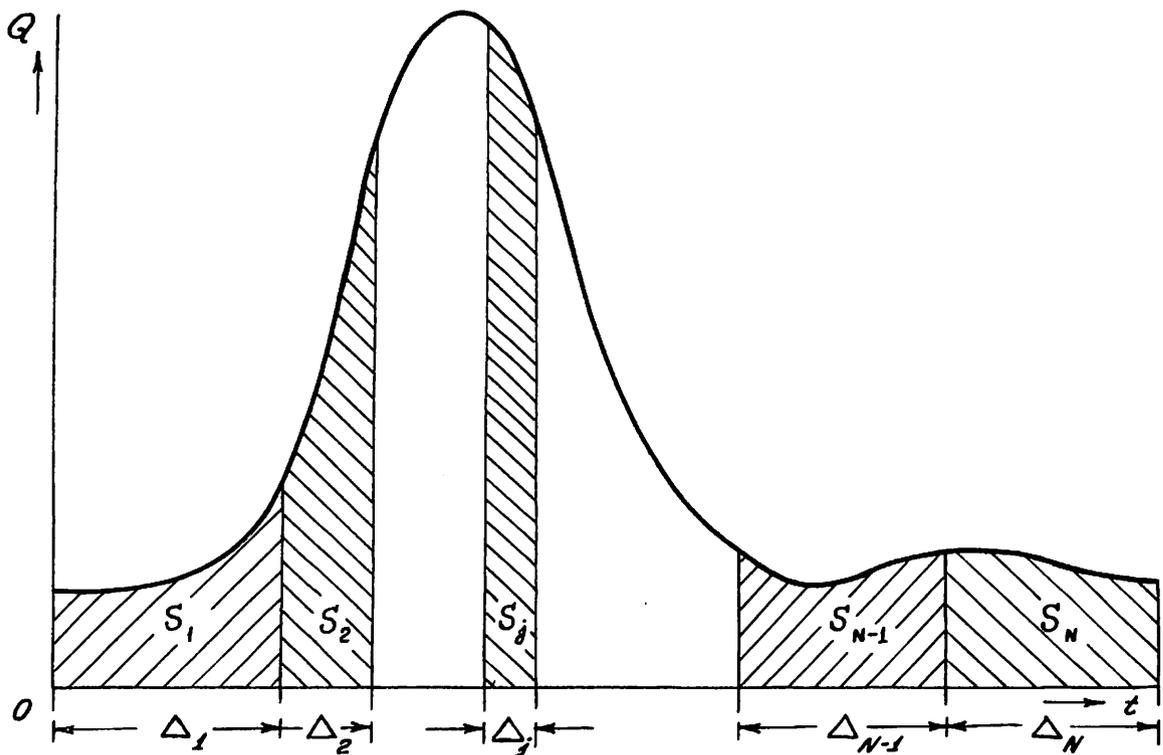


Рис.1 Схема деления осредненного (фиктивного) гидрографа на интервалы, в пределах которых объемы среднего стока равны

Календарные границы  $\Delta_j$  интервалов могут быть установлены различными способами. Наиболее простым, но вполне приемлемым способом представляет применение интегральной кривой

$$W(t) = \sum_{\epsilon=1}^{12} W_{\epsilon}$$
, где  $W_{\epsilon}$  - среднемесячный объем воды за весь период наблюдений. В качестве иллюстрации на рис.2 показан способ установления границ  $\Delta_j$  интервалов для стока р.Дунай (г.Хофкиршен) за период 1901-1968 гг.

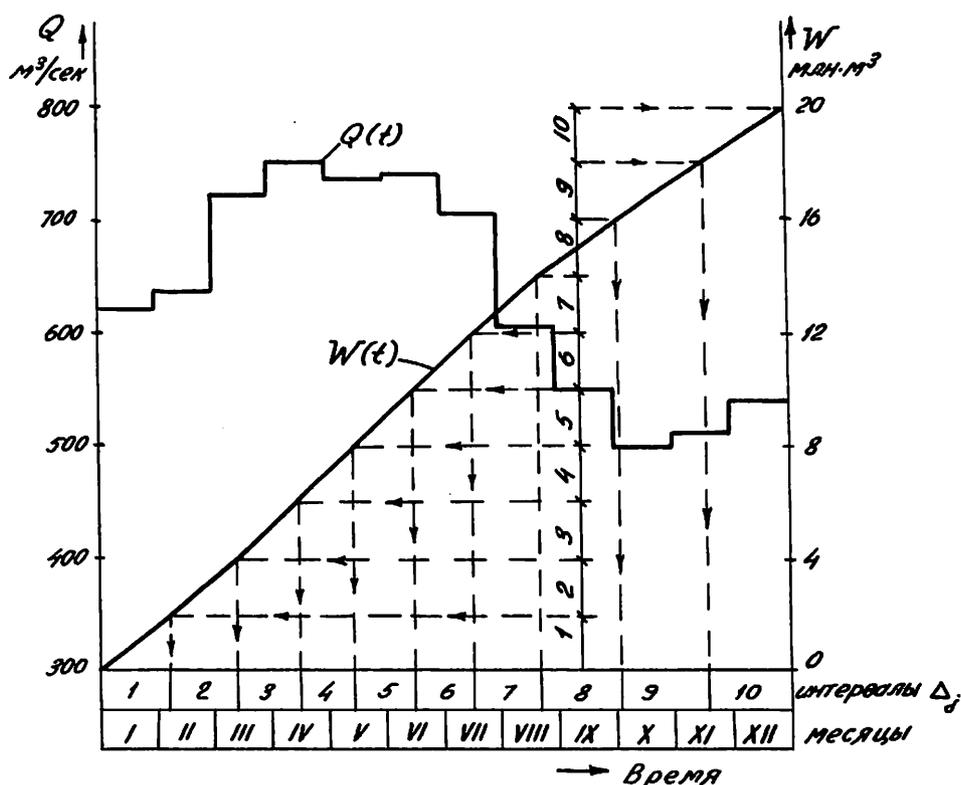


Рис.2 Установление календарных границ интервалов осреднения для Т модели стока р.Дунай (г.Хофкиршен, 1901-1968 гг).

Затем берем весь наблюдаемый за  $n$  лет гидрологический ряд и определяем соответствующие  $\Delta_j$  интервалам времени значения фактически наблюдаемых объемов стока  $S_j$ .

Предполагается, что полученная последовательность  $S_j$  является в широком смысле стационарной. Это, как известно, означает, что для заданного доверительного интервала математическое ожидание последовательности остается постоянным, а корреляционная функция зависит лишь от промежутка между двумя аргументами. Проверка этого предположения на примерах ряда рек, расположенных в различных физико-географических условиях (рр. Кура, Ингури, Нева, Дунай, Лаба, Нил и др.), показала правомерность гипотезы.

На рис.3 приводятся корреляционные функции для Т модели реки Нева (1859-1962 гг). Как следует из графика, условия стационарности удовлетворяются с коэффициентом доверия, равным 0,95. Аналогичные результаты получены по другим рекам.

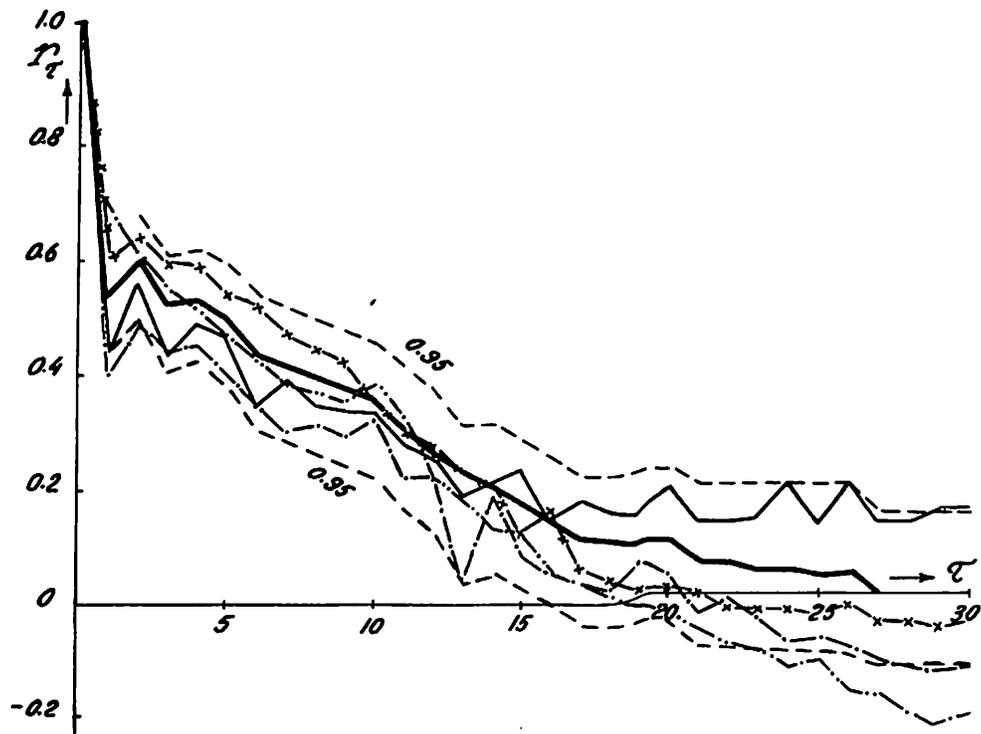


Рис. 3 Корреляционные функции Т модели р.Нева (д.Новосаратовка, 1859-1968 гг): 1-для всего ряда, 2-5 - при делении ряда на 4 участка

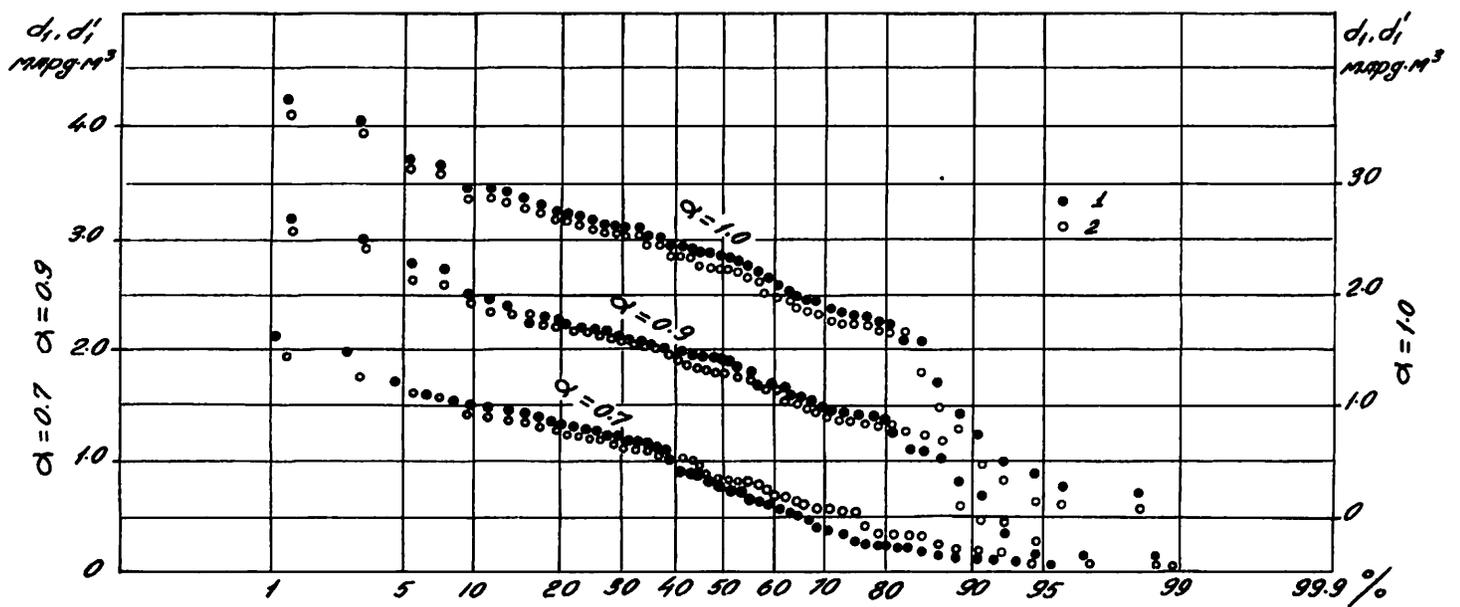


Рис. 4 Сопоставление дефицитов воды при различных значениях отдачи:  
1 - по исходному ряду, 2 - по Т модели (р.Кура, Тбилиси, 1923-64 гг).

Несмотря на отсутствие внешнего сходства между наблiденным гидрографом и соответствующей Т моделью они вполне идентичны в отношении такого определяющего фактора, каким является распределение дефицитов воды. На рис.4 для р.Куры (Тбилиси) дается сопоставление дефицитов воды для исходного ряда среднемесячных расходов воды  $d_i$  и по Т модели  $d_i$ . На наиболее интересном участке с обеспеченностью дефицитов 5-30% (чему ориентировочно соответствует обеспеченность отдачи 70-95%) совпадение данных можно считать вполне удовлетворительным. Незначительное расхождение можно частично объяснить неодинаковым числом интервалов в году (10 интервалов Т модели против 12 месяцев исходного ряда).

Приняв Т модель за основу, дальнейшие построения будут заключаться в следующем.

Поскольку может быть множество стационарных последовательностей с одинаковым одномерным законом распределения и корреляционной функцией, то в качестве дополнительного условия примем, что  $S_i$  последовательность относится к процессам N класса. Это означает следующее: если одномерные функции распределения нормальны, а корреляционная функция неотрицательно определена, то и многомерная функция распределения тоже будет нормальной.

Проверка показала, что как среднегодовые, так и среднемесячные расходы воды хорошо описываются  $S_D$  распределением Джонсона (4, 5). Принимая это распределение в качестве исходной, можно считать, что последовательность

$$X_i = \ln \left( \frac{S_i - a}{b - S_i} \right) - m \quad [2]$$

будет нормальной с параметрами

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \left( \frac{S_i - a}{b - S_i} \right) \quad [3]$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \ln \frac{S_i - a}{b - S_i} \right) - m \right]^2 \quad [4]$$

Здесь  $a$  и  $b$  - верхняя и нижняя границы случайной величины  $S_i$ . Один из возможных способов их установления, основанный на применении  $\chi^2$  критерия, заключается в вариантном переборе нескольких сочетаний  $0 < a < S_{\min}$  и  $b > S_{\max}$  [4].

Таким образом, моделирование процесса речного стока  $Q(t)$  сводим к моделированию случайной последовательности  $X_i$  с параметрами  $(0, \sigma^2)$ .

Исходя из сказанного, авторегрессионную модель  $X_i$  последовательности можно представить в следующем рекуррентном виде:

$$X_i = a_1^{(k)} X_{i-1} + a_2^{(k)} X_{i-2} + \dots + a_k^{(k)} X_{i-k} + \sigma_k S_i \quad [5]$$

где  $a_i^{(k)}$  ( $i=1,2,\dots,k$ ) - коэффициенты регрессии, соответствующие длине связности марковской цепи ( $k=0,1,2,\dots$ );  $\sigma_k$  - условный стандарт  $X_i$  при заданных предыдущих значениях процесса или же среднеквадратическое отклонение последовательности  $X_i$  от ее линейного прогноза.

Индекс  $(k)$  при коэффициентах  $a_i^{(k)}$  указывает на выбранную длину связности, которая нам заранее не известна и с изменением которой меняются значения коэффициентов регрессии и стандарта.

Пусть  $R_1 = E x_i \dots x_{i-1}$  - ковариация временного ряда на 1 шаг.

При  $k = 0$  будем иметь  $a_1^{(k)}, a_2^{(k)}, \dots, a_k^{(k)} = 0$  и  $\sigma_0^2 = R_0$

Если  $a_1^{(k-1)}, \dots, a_{k-1}^{(k-1)}$  и  $\sigma_{k-1}^2$  найдены, то последующие значения  $a_1^{(k)}, \dots, a_k^{(k)}$  и  $\sigma_k^2$  могут быть определены по следующим рекуррентным формулам Дарбина (6):

$$a_k^{(k)} = \frac{R_k - \sum_{j=0}^{k-1} R_{k-j} a_j^{(k-1)}}{R_0 - \sum_{j=1}^{k-1} R_{k-j} a_{k-j-1}^{(k-1)}} \quad [6]$$

$$a_1^{(k)} = a_1^{(k-1)} - a_k^{(k)} a_{k-1-1}^{(k-1)} \quad [7]$$

$$\sigma_k^2 = \sigma_{k-1}^2 \left[ 1 - (a_k^{(k)})^2 \right] \quad [8]$$

Длина связности  $K$  устанавливается исходя из критерия минимума дисперсии ( $\sigma_k^2 = \min$ ). Расчет следует прекратить тогда, когда отношение  $\sigma_k/\sigma_{k-1}$  станет близким 1 и, следовательно, можно принять гипотезу о том, что истинная длина связности равна  $K$ .

Приведенный способ определения коэффициентов регрессии и остаточных дисперсии существенно упрощают и сокращают вычислительную работу в сравнении с ранее применяемым способом решения систем уравнений.

Далее, подставляя полученные значения параметров в зависимость [5], с помощью последнего методом Монте-Карло для предстоящего расчетного периода моделируем искусственный ряд  $x_i$ .

Далее следует произвести перерасчет, чтобы вернуться к гидрологическим рядам  $S_i$ . При распределении Джонсона соответствующее выражение имеет вид

$$S_i = \frac{be^{x_i + m} + a}{e^{x_i + m} + 1} \quad [9]$$

Повторяя расчет в  $L$  раз (при различных значениях  $S_i$ ), получим соответствующее количество условных реализаций процесса в виде условных гидрологических рядов  $S_i$ .

Последующие водохозяйственные или водноэнергетические расчеты должны вестись обычным календарным методом, т.е. путем учета водопотребления, потерь воды на испарение и фильтрацию, сработки уровня воды в водохранилище и т.д. Следует, однако, помнить, что интервалы  $\Delta j$  являются неравновеликими по протяженности, но имеют жесткие календарные границы, постоянные для всех лет.

Предлагаемая методика позволяет для вероятностного решения задачи на промежуточном этапе использовать более простые детерминистические методы оптимизации режима работы гидроузла. Имея  $L$  реализации, управление режимом работы гидроузла можно с известным приближением производить по каждой реализации в отдельности, условно считая, что располагаем однозначным (детерминированным) прогнозом на  $n_0$ -летний расчетный срок работы водохранилища. Конечно, в действительности однозначного прогноза на несколько лет вперед не может быть, однако, как уже оговорились, с очень малой вероятностью  $(1/L)^*$  такое допущение условно может быть принято. Тогда при известной приточности  $S_i$  установление оптимального плана регулирования не

\* Например, если  $L = 500$ , то статистическая вероятность каждой реализации будет 0,2%.

представляет особых трудностей. Выработав соответствующую политику управления и запрограммирования ее расчет можем повторить  $L$  раз для  $n_0$ -летнего периода. Далее, по той же программе производим статистическую обработку данных через определенные интервалы времени (например, через каждый год или через каждые 3-5 лет) и строим соответствующие условные функции распределения вероятностей выходных процессов: выработки электроэнергии и располагаемых мощностей гидроэлектростанций, полезной отдачи воды для целей орошения и водоснабжения, наполнения водохранилищ, холостных сбросов воды и т.д., что и является конечной целью водохозяйственных или водноэнергетических расчетов.

В заключение можно отметить следующее.

Для окончательной оценки  $T$  модели проведенные нами экспериментальные расчеты, конечно, не достаточны, но на их основе, а также по общим теоретическим соображениям, могут быть сделаны некоторые предварительные выводы.

Модель не нуждается в определении оценок характеристик  $(C_v, C_s, \chi(\tau))$  по ограниченному наблюдаемому ряду как это имеет место в случае любых других моделей стока. Она имеет меньшие интервалы в паводковый период и большие - при межени, что является вполне естественным, поскольку в паводковый период требуется более оперативное управление стоком, чем в межень период, когда величины расхода воды менее подвержены резким колебаниям. В  $T$  модели стохастические связи теснее, чем, например, в исходном ряде среднегодовых или среднемесячных расходов воды, что открывает дополнительные возможности для прогноза стока.

Модель позволяет учитывать не только объемы стока в предыдущие интервалы времени, но также и ряд других предикторов, каковыми являются осадки, температура, атмосферная циркуляция и т.д.

Вместе с тем  $T$  модель имеет ряд негативных сторон. Например, наличие неравных интервалов на временной оси создает определенные неудобства, при групповом моделировании гидрологических рядов (для расчета системы гидроузлов) интервалы стационарности в различных створах могут оказаться различными и т.д. Однако, положительные стороны модели превалируют над отрицательными, поэтому модель, безусловно, заслуживает применения для решения практических задач, вообще, и при проектировании гидроузлов в бассейне р. Дунай, в частности.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Сванидзе Г.Г. Основы расчета регулирования речного стока методом Монте-Карло. Тбилиси, "Мецниереба", 1964.
2. Сванидзе Г.Г., Торонджадзе А.Ф., Эдиберидзе М.Г., Читашвили Р.Я. Методика построения математической модели, описывающей процесс речного стока с анализом принятых стохастических гипотез. "Сообщения АН ГССР", 1969, т. 53, №1.
3. Сванидзе Г.Г., Пиранашвили З.А. О математических моделях речного стока и их использовании для гидрологических расчетов и прогнозов. Труды САНИГМИ, Л., Гидрометеиздат, 1972, вып.1 (82).
4. Сванидзе Г.Г., Григолия Г.Л. Применение распределения Джонсона для расчета речного стока. "Водные ресурсы", 1974, №6.
5. Церетели З.И., Читашвили Р.Я. Об одной модели речного стока при водноэнергетических расчетах. "Сообщения АН ГССР", 1973, т. 71, №3.
6. Durbin J. Estimation of Parameters in Time Series Regression Models. Journal of the Royal Statistical Society, 1960, series B.
7. Svanidze G.G. Use of Digital Computers for Mathematical Modelling of Hydrologic Processes. Symposium of Analog and Digital Computers in Hydrology, USA, Tuscon, Arizona, 1968, vol.1.

8. Svanidze G.G. Mathematical Models of Process of Runoff in Calculating Storage Reservoirs. Intern. Symposium on Application of Mathematical Models in Hydrology, Warsaw, 1971.
9. Svanidze G.G. Matematische Modellierung in der Speicherwirtschaft. Zeitschrift "Wasserwirtschaft - Wassertechnik", 1974, Nr.3.

## 6. DISKUSSION

### Cehak:

1. Wie ist die Wangenheim-Zahl definiert?
2. Haben Sie eine Theorie über den Einfluß der solaren Tätigkeit auf die Niederschläge?

### Prohaska:

1. Die Wangenheim-Zahl wird auf der Basis des Charakters der Luftmassenübertragung über der nördlichen Halbkugel bestimmt. Nach Wangenheim gibt es ungefähr 48 Typen der Übertragung von Luftmassen, die man im wesentlichen in 3 Grundtypen einteilen kann: den westlichen W, den östlichen E und den nicht-radialen Typ C. Auf der Grundlage synoptischer Karten wird täglich die Verschiebung der Luftmassen beobachtet und für jeden Tag die vorherrschende Verschiebung im Laufe dieses Tages hinzugefügt. Die Anzahl der Tage mit einem bestimmten Luftverschiebungstyp im Laufe eines Jahres ist der Wangenheim-Index dieses Typs. Die Daten selbst sind veröffentlicht, und ich habe sie aus der Literatur verwendet.
2. Es gibt eine Theorie der Einwirkung der solaren Tätigkeit auf alle Prozesse, die sich in der Atmosphäre und auf der Erde vollziehen, darunter auch auf die Niederschläge - aber das ist nicht das Thema meines Vortrages. Meine Ansicht ist die folgende: Zwischen der solaren Tätigkeit und dem Abfluß gibt es einen Komplex von kausal-konsekutiven Zusammenhängen, der durch eine große Anzahl von Zufallselementen gekennzeichnet ist. Deswegen halte ich die solare Tätigkeit und den Abfluß für zwei zufällige Prozesse. Unter Anwendung der Theorie zufälliger Prozesse ist die vorgestellte Analyse- und Prognosemethodik ausgearbeitet.

### Meier:

Herr Robinson hat eine Periodizität der Mittelwerte in einem stochastischen Modell berücksichtigt (mittels einer Fourier-Analyse). Wird auch eine Periodizität im zweiten statistischen Moment (Streuung, Varianz) berücksichtigt? (Ebenfalls mittels einer Fourier-Analyse?)

### Robinson:

Eine Fourier-Analyse ist ausgeführt worden um die harmonischen Koeffizienten der Periodizität von sowohl dem Mittelwert als auch der Standardabweichung zu bestimmen. Davon werden die signifikanten Zyklen abgeleitet sowie die erklärte Varianz der deterministischen Zyklizität (Gl. 2. und 3.). Die saisonbereinigende Transformation der Reihen (Gl. 8 und 15) wurde durchgeführt mit den wirklichen monatlichen Mittelwerten und Standardabweichungen.

### Dementjew:

In dem Vortrag von Prohaska wurde eine Eintrittswahrscheinlichkeit der Prognosen von 94% nach der vorgeschlagenen Methode angegeben. Erläutern Sie bitte, wie diese Treffsicherheit erreicht wurde - nach der abhängigen Reihe, die in die Auswertung übernommen wurde, oder nach der unabhängigen Reihe, die bei der Erlangung der prognostischen Gleichungen nicht in die Auswertung eingeschlossen worden ist?

### Prohaska:

Die Bewertung der Treffsicherheit der Prognosen wurde auf der Grundlage der Methodik des GGI (Staatliches Hydrologisches Institut) durchgeführt, und zwar deshalb, weil eine sehr kleine Zahl unabhängiger Prognosen emittiert worden ist, und daher war es nicht möglich, andere statistische Beurteilungsmethoden heranzuziehen. Auf diese Weise ergab sich die Eintrittswahrscheinlichkeit nach der unabhängigen Reihe, die bei der Erlangung der prognostischen Gleichungen nicht in die Auswertung übernommen wurde.

Ginzburg:

Herr Kollege Robinson, wie ist das Signifikanzniveau, welchem die Hüllkurven auf Ihren Diagrammen entsprechen?

Robinson:

Die exakte Wahrscheinlichkeit oder das Signifikanzniveau einer monatlichen Abflußvorhersage ist mit Hilfe eines Niederschlag-Abfluß Übertragungsfunktionsmodell nur recht schwierig zu bestimmen. Eine Möglichkeit besteht darin, den unbekanntem Niederschlag durch Annahme eines erwarteten Tief-, Normal- und Hochwertes in der Prognosezeit, einen Monat im voraus zu schätzen und damit einen wahrscheinlichen Bereich von prognostiziertem Abfluß. Dieser Wert könnte z.B. den Standardfehler des mittleren Niederschlages oder einen bestimmten prozentualen Wert des Niederschlages, im Monat darstellen. Bei angenommener Normalverteilung würde  $X_j \pm 1.96 S_j$  95% wahrscheinlichen Regen im Monat j enthalten. (Wobei  $S_j$ ,  $S_j$  das Mittel und die Standardabweichung im Monat j bedeuten).

Mendel:

Beim Symposium über "Schnee und Eis in der Hydrologie" (Banff, Kanada, 1972) wurden Satellitenaufnahmen sehr skeptisch beurteilt. Ich bin daher sehr überrascht, von Herrn Parschin diese optimistischen Aussagen zu hören.

Parschin:

Seit 1972 ist nicht wenig Zeit vergangen, und die Satelliten-Informationen haben sich verbreitet und sind immer genauer geworden. Einstweilen haben die Wetter-Satelliten eine noch nicht ausreichend entscheidende Tauglichkeit für die Ziele der hydrologischen Prognosen, obwohl auch sie bestimmte Informationen über die Schneedecke geben, die in der operativen Praxis ausgewertet werden können, was auch in dem Vortrag von Deleur gezeigt wurde. Augenscheinlich werden die Satelliten bald bei der Erforschung der Naturschätze eine große und entscheidende Leistungsfähigkeit haben, und wir müssen dann bereit sein, diese qualitativ neuen Informationen bei den hydrologischen Berechnungen und Prognosen zu verwerten.

Podani:

Zu Deleur: Im Zusammenhang mit dem interessanten Referat, das von Professor Parschin vorgetragen wurde, möchte ich noch die Tatsache unterstreichen, daß bei uns die Satelliten gute Informationen über die Zirkulation der Atmosphäre geben, was - wie es deutlich in dem Referat von Prohaska zum Ausdruck kam - für die Prognose sehr wichtig ist: die Messung der Schneedecke von Satelliten aus bringen vorläufig noch keine Ergebnisse, aber sie werden wahrscheinlich in Zukunft mit anderen photographischen Verfahren vervollkommen werden.

Zu Prohaska: Die Statistik der solaren Tätigkeit und der Zirkulation der Atmosphäre eröffnet neue Möglichkeiten. Wir empfehlen, die Arbeit von V. Dumitresku zu studieren, die auf der vorigen Konferenz in Varna vorgestellt worden ist. Mit diesem Referat wurden die Fragen der Zirkulation der Atmosphäre gut ausgewertet, ebenso wie die Grenzen der Genauigkeit, die nicht mit den Ergebnissen Ihres Referates übereinstimmen, obwohl sie nur einen einzigen unmittelbaren Beeinflussungsfaktor berücksichtigen.

Zu Swanidse: Die Verwendung der "gleitenden" Skalen (dauernde Zeitintervalle) verändert nicht die tatsächliche stochastische Reihe, sondern sie erlaubt nur, bestimmte Gesetzmäßigkeiten der bestehenden Reihe zu zeigen. Die gleiche Wirkung kann aber auch durch die Bearbeitung der Daten nach der klassischen Methodologie erreicht werden, wenn man die Wassermenge als statistische Reihe nimmt, oder noch besser, wenn man sie nach dem Prinzip der komplexen Wahrscheinlichkeitsgrößen (Q und W) bearbeitet.

## 6. Д И С К У С С И Я

### Цехак:

1. Как определяется число Вангенгейма?
2. Есть ли у вас теория о воздействиях солнечной деятельности на осадки?

### Прохаска:

Индекс Вангенгейма определяется на основании характера переноса воздушных масс над северным полушарием. По Вангенгейму существует около 48 типов переноса воздушных масс, которые главным образом можно разделить на три основных типа - западный W, восточный E и меридиональный S. На основании синоптических карт ежедневно наблюдается перенос воздушных масс и для каждого дня приписывается преобладающий перенос в течении этого дня. Число дней с определенным типом переноса воздуха в течении года представляет собой индекс Вангенгейма этого типа. Сами данные опубликованы и я использовал их из литературы.

Существует какая-то теория воздействия солнечной деятельности на все процессы, происходящие в атмосфере и на Земле, в том числе и на осадки - но это не тема моего доклада. Моя точка зрения такая: Между солнечной деятельностью и речным стоком существует комплекс причинно-следственных связей, характеризующийся большим числом элементов случайности. Поэтому я рассматриваю солнечную деятельность и речной сток как два случайных процесса. Применяя теорию случайных процессов разработана представленная методика анализа и прогноза.

### Мейер:

Господин Робинзон учитывал периодичность средних величин в своей стохастической модели (посредством анализа Фурье). Учитывается ли также периодичность и во втором статистическом моменте (рассеивание, вариантность)? (также путем анализа Фурье?)

### Робинзон:

Для определения гармонических коэффициентов периодичности - как от среднего значения, так и от стандартных отклонений - был выполнен анализ Фурье. Из него выводятся зигнификационные циклы, а также и объясненная вариация детерминистической цикличности (уравнения 2 и 3). Сезонноурегулированное преобразование рядов (уравнения 8 и 15) было проведено с действительными среднемесячными значениями и стандартными отклонениями.

### Дементьев:

В докладе была приведена оправдываемость прогнозов по предлагаемому методу, равная 94%. Объясните пожалуйста, как получена эта оправдываемость - по зависимому ряду, вошедшему в обработку, или по независимому ряду, не включенному в обработку при получении прогностических уравнений?

### Прохаска:

Оценка оправдываемости прогнозов сделана на основании методики ГГИ, по той причине, что было выпущено очень малое число независимых прогнозов и поэтому другими статистическими методами оценки невозможно было пользоваться. Таким образом, оправдываемость получена по независимому ряду, который не включен в обработку при получении прогностических уравнений.

Гинзбург:

Коллега Робинзон, каков уровень значимости, которому соответствуют проведенные на ваших графиках огибающие линии?

Робинзон:

Точная вероятность, или сигнификационный уровень, одного месячного прогноза стока лишь с трудом определяется с помощью переносной функции модели атмосферных осадков стоков. Одна возможность заключается в том, что неизвестные осадки оцениваются на один месяц вперед путем принятия по одному ожидаемому нижнему, нормальному и верхнему значению в прогнозируемом периоде; тем самым оценивается вероятностная область прогнозируемого стока. Это значение могло бы, к примеру, представить стандартную погрешность среднего осадка, или определенное процентуальное значение осадков в месяц.

При принятом нормальном распределении  $X_j \pm 1,96 S_j$  оно содержало бы в 95% вероятности дождя в месяце  $j$ . (При этом  $X_j$ ,  $S_j$  означают среднюю величину и стандартное отклонение в месяце  $j$ ).

Мендель:

На симпозиуме по снеговым и ледяным явлениям в гидрологии (Банфф, Канада, 1972) снимки, сделанные спутниками, оценивались очень скептически. Поэтому меня удивляют оптимистические высказывания г-на Паршина.

Паршин:

С 1972 г. прошло немало времени и спутниковая информация расширилась и стала детальной. Пока метеорологические спутники имеют недостаточную разрешающую способность для целей гидрологических прогнозов, хотя и они дают определенную информацию о снежном покрове, которая может быть использована в оперативной практике, что и показано в докладе Делера. Очевидно скоро спутники по изучению природных ресурсов будут иметь большую разрешающую способность и мы должны быть готовы к использованию этой качественно новой информации в гидрологических расчетах и прогнозах.

Подани:

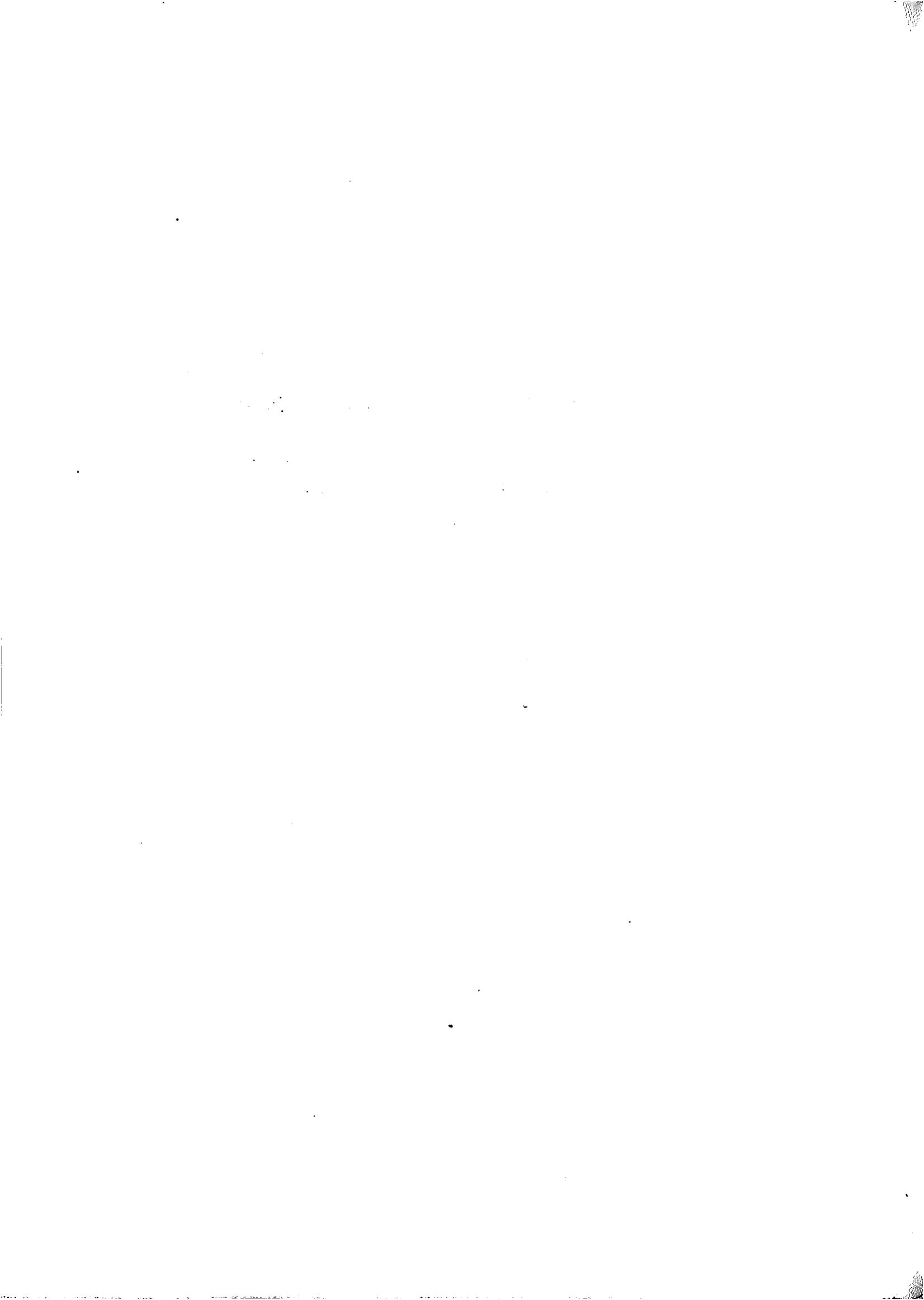
В адрес Делера: В связи с интересным рефератом, представленный проф. Паршиным, хочу подчеркнуть тот факт, что у нас спутники дают хорошие информации о циркуляции атмосферы, что очень важно для прогноза, как это ясно выявляется в реферате Прохаски: Измерения снежного покрова со спутников пока что не дают результаты, но, наверное, в будущем они усовершенствуются путем использования других способов фотографирования.

В адрес Прохаски: Учет солнечной активности и циркуляции атмосферы дает новые возможности. Рекомендуем изучить работу В.Думитреску, которая была представлена на предыдущей конференции в Варне. В этом реферате вопросы циркуляции атмосферы были хорошо использованы, а также пределы точности, которые не соответствуют результатам вашего реферата, хотя учитывают лишь один директный фактор влияния.

В адрес Сванидзе: Использование "скользящей" шкалы (постоянные интервалы времени) не изменяет фактический стохастический ряд, а лишь позволяет выявить определенные закономерности существующего ряда. Тот же самый эффект может быть получен обработкой данных по классической методологии, если взять объемы воды как статистический ряд, или еще лучше если обрабатывать их по принципу комплексных вероятных величин ( $Q$  и  $W$ ).

"Vorhersage von niedrigen Wasserständen und Abflüssen  
(kurz- und langfristig)"

"Прогноз низких уровней и расходов воды  
(краткосрочный и долгосрочный)"



ДОЛГОСРОЧНЫЙ ПРОГНОЗ МИНИМАЛЬНЫХ УРОВНЕЙ ДУНАЯ

В. В. Климова

LANGFRISTIGE VORHERSAGE MINIMALER WASSERSTÄNDE DER DONAU

W. W. Klimova

Резюме

В методе учитываются характеристики атмосферной циркуляции, которая в конечном счете вызывает изменение водного режима Дуная.

Вычислены коэффициенты разложения полей давления и температуры воздуха у поверхности земли по естественным ортогональным функциям. Эти коэффициенты использованы для установления прогностических корреляционных связей с минимальными уровнями Дуная.

Zusammenfassung

Die beschriebene Methode berücksichtigt die Charakteristiken der atmosphärischen Zirkulation, welche letzten Endes eine Veränderung des Wasserregimes der Donau bedingt.

Es wurden Koeffizienten der Zerlegung der Druckfelder und der Lufttemperatur in Bodennähe mittels natürlicher Orthogonalfunktionen berechnet. Diese Koeffizienten wurden für die Feststellung prognostischer Korrelationszusammenhänge mit minimalen Wasserständen der Donau benützt.

В задачу данной работы входило получение методики прогноза минимальных уровней Дуная с заблаговременностью 1-3 месяца для створов, расположенных выше водохранилища у Железных Ворот.

Для исследования был использован период наблюдений над уровнями воды с 1941 г. по 1970 г. в створах: Вена, Будапешт и Богоево.

Наиболее благоприятным для навигации на Дунае является период стояния высоких вод. В апреле-августе, как правило, обеспечиваются гарантийные глубины, и суда в этот период ходят с полной нагрузкой.

За период наблюдений (1941-70 гг.) в июне, июле и августе наблюдались минимальные уровни воды, превышающие низкий судоходный регуляционный уровень, и лишь в августе 1947 г. наблюдался уровень ниже НСРУ.

В период межени условия судоходства меняются. Неблагоприятными для судоходства являются сентябрь, октябрь, ноябрь месяцы, когда уровень воды может снижаться до отметки ниже низкого судоходного регуляционного уровня (НСРУ). Для Дуная у Вены этот уровень равен 152 см., у Будапешта - 160 см. и у Богоево - 112 см. Самые низкие уровни воды на Дунае за исследуемый период наблюдались в ноябре 1947 г. В дальнейшем все разработки произведены для минимальных уровней Дуная, наблюдающихся в сентябре, октябре и ноябре.

В формировании стока в сентябре-ноябре принимают участие запасы воды в русле и сток подземных вод, а также поверхностный сток от дождей. В качестве показателей запасов русловых и подземных вод, а также общей увлажненности водосбора могут быть приняты характеристики предшествующего водного режима реки.

Почти все методы долгосрочного прогноза минимального стока основаны на представлении об истощении запасов воды в речном бассейне в летне-осенний период. Эти методы часто не поз-

воляют получить прогноз водного режима необходимой точности и заблаговременности, так как в формировании водного режима в осенний период существенную роль играют осадки, учет которых усложняет разработку методики долгосрочного прогноза водного режима р. Дунае и, в частности, минимальных уровней воды.

При разработке методики долгосрочного прогноза минимальных уровней воды р. Дуная в данной работе рассмотрены два вопроса:

1. Определение гарантированных минимальных уровней Дуная, то есть уровней ниже которых не опустятся уровни данного месяца при соответствующих условиях водности предшествующего периода.
2. Определение превышений минимальных уровней воды над гарантированным, обуславливаемых, в основном, осадками.

По графикам связи минимальных уровней воды текущего месяца с минимальными уровнями предшествующих месяцев можно определить тот уровень воды, который обусловлен, в основном, истощением имеющихся в бассейне запасов воды, и ту долю уровня воды, которая зависит от осадков, выпадающих за период заблаговременности прогноза.

Естественно, что поскольку мы имеем дело с уровнями воды, а не со стоком, такое деление носит несколько условный характер, но все же отражает картину формирования уровня воды в период межени.

Для Вены, Будапешта и Богоево при исследовании были построены графики связи минимальных уровней воды с заблаговременностью 1, 2 и 3 месяца, и на каждом из них проведена нижняя огибающая, для которой получено уравнение регрессии. По этим уравнениям определены минимальные гарантированные уровни воды с разной заблаговременностью.

На рис. 1а приведен график связи минимальных уровней воды Дуная у Вены за ноябрь месяц с минимальными уровнями августа. Зная минимальный уровень воды у Вены в августе, по уравнению:

$$H_{\text{мин. XI}} = 0.26 H_{\text{мин. VIII}} + 30 \quad [1]$$

можно получить гарантированный минимальный уровень воды в ноябре.

Разность между наблюдавшимся минимальным уровнем воды и гарантированным минимальным уровнем связывается с осадками за предшествующие и текущий месяцы. Получены уравнения регрессии, с помощью которых можно определить превышения минимальных уровней воды над гарантированным по величине осадков.

На рис. 1б представлен график связи превышений минимальных уровней Дуная у Вены с осадками октября

$$H_{\text{мин. XI}} = 0.75 X_{\text{X}} + 14 \quad [2]$$

Таким образом, зависимость минимального уровня воды у Вены в ноябре от минимального уровня в августе и осадков октября имеет такой вид:

$$H_{\text{мин. XI}} = 0.26 H_{\text{мин. VIII}} + 0.75 X_{\text{X}} + 44 \quad [3]$$

Оценка этой зависимости по отношению  $\frac{S}{\sigma} = 0,58$ .

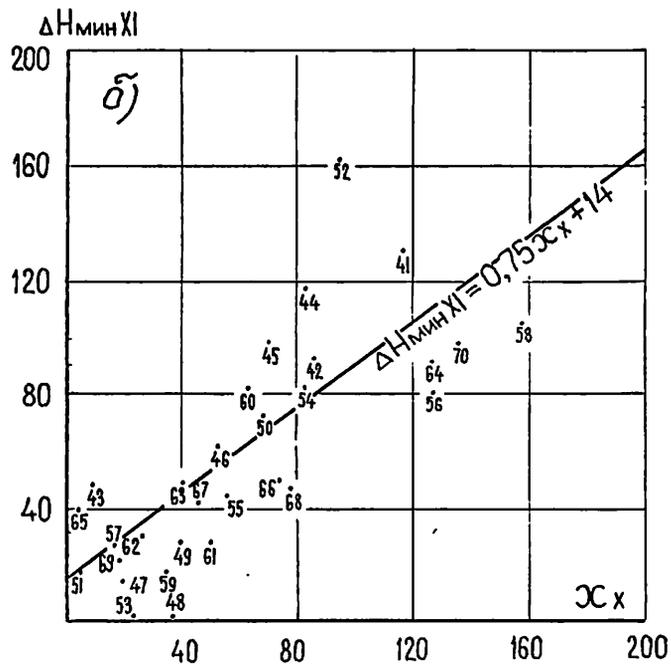
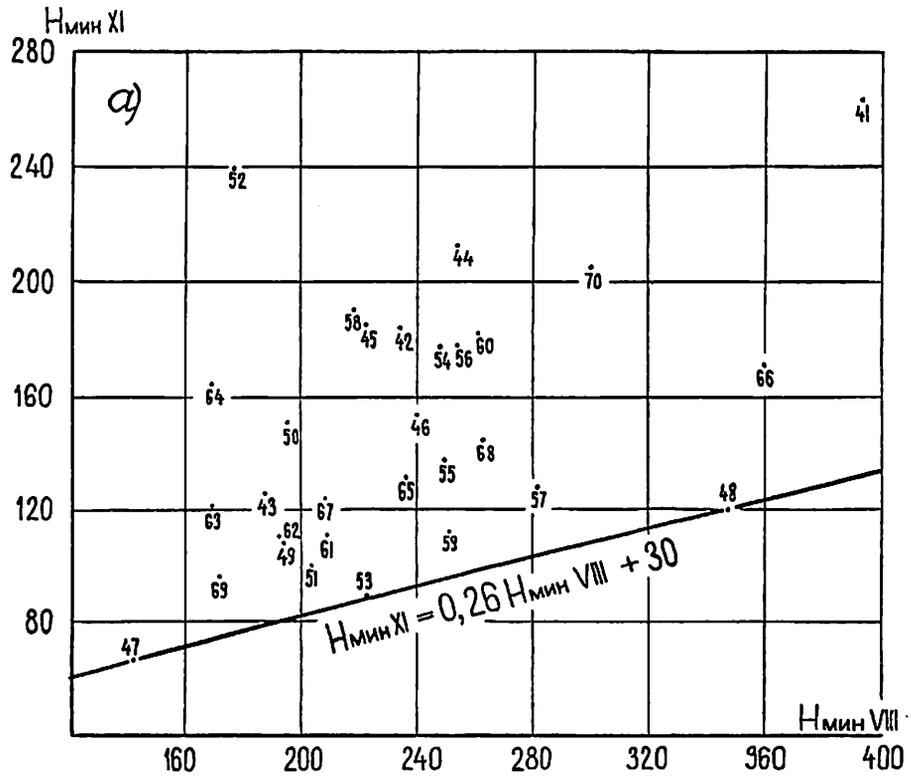


Рис. 1 р. Дунай - Вена. а) Зависимость между минимальными уровнями воды ноября и августа. б) Зависимость превышений минимальных уровней ноября над гарантированной линией от осадков октября.

В таблице 1 даны уравнения регрессии для определения минимальных уровней Дуная у Вены. В этих уравнениях одна часть уровня определяется минимальным уровнем воды, наблюдавшимся в прошлые месяцы, а другая часть - осадками за период заблаговременности прогноза. В таблице приведена оценка этих уравнений в виде отношения средней квадратической ошибки ( $S$ ) к среднему квадратическому отклонению от нормы ( $\bar{\sigma}$ ).

Таблица I

Параметры зависимостей минимальных уровней Дуная у Вены ноября, октября, сентября от минимальных уровней за предшествующие месяцы и осадков за период заблаговременности

№ пп	Минимальные уровни воды, см		Коэффициенты при минимальных уровнях воды				Коэффициенты при осадках				$C_0$	$\frac{S}{\bar{\sigma}}$
			УП	УШ	ІХ	Х	УШ	ІХ	Х	ХІ		
1.	$H_{\text{мин}}$	ХІ		0,26				0,16	0,68	-0,05	35	0,56
2.	$H_{\text{мин}}$	ХІ		0,26				0,16	0,68		32	0,54
3.	$H_{\text{мин}}$	ХІ		0,26					0,70	-0,04	46	0,59
4.	$H_{\text{мин}}$	ХІ		0,26					0,75		44	0,58
5.	$H_{\text{мин}}$	ХІ			0,55				0,70	0,22	- 8	0,43
6.	$H_{\text{мин}}$	ХІ			0,55				0,73		6	0,46
7.	$H_{\text{мин}}$	ХІ				0,79				0,26	10	0,52
8.	$H_{\text{мин}}$	Х	0,31				0,008	0,52	0,53		- 5	0,66
9.	$H_{\text{мин}}$	Х	0,31					0,52	0,53		- 4	0,66
10.	$H_{\text{мин}}$	Х		0,23				0,51	0,42		37	0,60
11.	$H_{\text{мин}}$	Х			0,58				0,41		24	0,55
12.	$H_{\text{мин}}$	ІХ		0,34				0,53			63	0,54

Количественный прогноз осадков на длительный период пока не составляется. Для разработки метода прогноза осадков и водного режима реки, обусловленного влиянием метеорологических факторов, в работе использован физико-статистический метод, применяемый в исследованиях по долгосрочным прогнозам погоды. При этом характеристики исходного состояния атмосферы, предопределяющие будущую погоду, представляются в виде параметров разложения метеорологических полей по естественным составляющим.

Сущность этого метода и применение математического аппарата освещено в работах Н.А.Багрова (1), А.В.Мещерской и др. (3, 4), А.М.Обухова (5), М.И.Юдина (7, 8).

В настоящем исследовании проведен анализ полей аномалии давления и аномалии температуры воздуха у земной поверхности в северном полушарии за июль-ноябрь месяцы. Для чего в исследуемом периоде (1941 - 70 гг.) произведено разделение лет по водности: выше нормы, ниже нормы и около нормы.

Для каждой группы лет с карт аномалии давления и аномалии температуры у земной поверхности снимаются данные с центров положительных и отрицательных очагов и наносятся на бланки карт, затем рассматриваются районы, где для лет по водности выше и ниже нормы очаги аномалии давления или температуры имеют противоположные знаки.

В процессе предварительного исследования было установлено, что для прогноза осадков, а следовательно и уровней Дуная в сентябре, октябре и ноябре необходимо учитывать данные полей аномалии температуры в июле, августе и сентябре над западными районами Атлантики, Западной Европой и над Западной и Восточной Сибирью, то есть в районах 3 центров действия атмосферы: азорского антициклона, исландской депрессии и сибирского антициклона.

Например, из анализа видно, что в годы когда водность на Дунае в ноябре выше нормы над Западной и Восточной Сибирью в июле преобладает отрицательная аномалия температуры, а в годы с водностью в ноябре ниже нормы преобладает положительная аномалия температуры.

В результате анализа было выбрано три района с координатами: I район -  $70^{\circ}$  -  $40^{\circ}$  с.ш. и  $10^{\circ}$  -  $60^{\circ}$  в.д.; II район -  $70^{\circ}$  -  $40^{\circ}$  с.ш. и  $70^{\circ}$  -  $150^{\circ}$  в.д.; III район -  $70^{\circ}$  -  $40^{\circ}$  с.ш. и  $10^{\circ}$  -  $130^{\circ}$  в.д.

В каждом районе выбирается 28-36 точек, значения аномалии температуры в которых снимаются на пересечении долгот с широтами через  $10^{\circ}$  и  $20^{\circ}$ .

Для получения прогностических зависимостей используется не сама аномалия температуры, а коэффициенты разложения по естественным составляющим полей аномалии температуры у земной поверхности за июль, август и сентябрь в трех выбранных районах северного полушария.

Проведенные предварительные исследования указывают, что связь осадков и минимальных уровней Дуная с характеристикой термического поля в выбранных районах более тесная, чем с характеристикой барического поля. Возможно это вызвано тем, что исследование полей ограничивается широтой  $40^{\circ}$ , в дальнейшем предполагается использовать данные метеорологических полей южнее Западной Европы.

В результате разложения метеорологических полей получаются: коэффициенты разложения  $B_i$ , ряды собственных чисел  $\lambda_i$  в убывающем порядке и собственные вектора разложения  $X_i$ . Коэффициенты разложения определяются по формуле

$$B_i = \frac{\sum_{n=1}^n \Delta T X_n}{\sum_{n=1}^n X_n^2} \quad [4]$$

где  $B_i$  - коэффициент разложения, соответствующий данному году,  $n$  - число точек поля, по которому ведется разложение,  $\Delta T$  - данные аномалии температуры,  $X_n$  - собственные вектора.

На основе метода разложения метеорологических полей по естественным ортогональным функциям, как отмечено в работах Н.А.Багрова (1) и А.В.Мещерской и др. (4), можно выделить наиболее существенные особенности циркуляции над исследуемым районом с помощью небольшого числа первых членов разложения и учесть их в прогностических схемах. Авторами отмечено, что изменение во времени коэффициентов разложения будет носить более закономерный характер, чем изменение непосредственно исходных данных о конкретном поле.

Используя в качестве аргументов коэффициенты разложения метеорологических полей по естественным ортогональным функциям, удастся совместить два важных прогностических требования: по возможности полно представить начальную информацию о метеорологических полях и ограничить число предикторов.

Вопрос о том сколько коэффициентов разложения каждого конкретного поля следует включать в уравнение для прогноза минимального уровня воды весьма важен, поскольку при отбрасывании части естественных ортогональных функций уменьшается точность представления исходных полей.

В среднем около 90% информации о характере метеорологического поля содержится в первых 8-9 слагаемых разложения поля. В работе при выборке аргументов рассматривается 10 коэффициентов разложения поля аномалии температуры воздуха. Разложение аномалии температуры по естественным составляющим произведено на ЭВМ-222 по программе (на АЛГОЛЕ), разработанной в Гидрометцентре СССР.

Одним из способов получения прогностических зависимостей является статистический, основанный на установлении корреляционных связей между осадками и коэффициентами, полученными в результате разложения поля аномалии температуры.

Вычисление уравнений регрессии выполнено для осадков октября, ноября в бассейне Дуная до Вены, Будапешта и Богоево. Наиболее тесная зависимость получена для осадков октября от коэффициентов разложения аномалии температуры августа во II районе ( $70^{\circ}$  -  $40^{\circ}$  с.ш. и  $70^{\circ}$  -  $150^{\circ}$  в.д.).

Для бассейна Дуная уравнения для вычисления осадков октября имеют следующий вид:

$$\text{до Вены} \quad X_{\bar{x}} = -1,8B_1 + 5,3B_2 - 1,3B_3 - 7,1B_4 + 10,8B_5 + 65 \quad [5]$$

$$\text{до Будапешта} \quad X_{\bar{x}} = -1,8B_1 + 4,2B_2 - 1,3B_3 - 7,2B_4 + 9,8B_5 + 61 \quad [6]$$

$$\text{до Богоево} \quad X_{\bar{x}} = -1,6B_1 + 4,6B_2 - 1,7B_3 - 5,6B_4 + 9,5B_5 + 59 \quad [7]$$

Имея возможность предсказать осадки на октябрь месяц, можно составить прогноз минимальных уровней Дуная у Вены, Будапешта и Богоево на ноябрь месяц.

В работе сделана попытка получить прогностические зависимости непосредственно для минимальных уровней Дуная, используя коэффициенты разложения аномалии температуры в трех выбранных районах, без учета предшествующей водности. Результаты этих расчетов показали, что учет предшествующей водности повышает точность прогнозов минимальных уровней воды.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. - Труды ЦИП, 1959, вып. 75, с. 3-24.
2. Воробьева Е.В. Сопряженность атмосферных процессов в северном полушарии. Л., Гидрометеиздат, 1962, 116 с.
3. Мещерская А.В., Клюквин Л.Н. О разложении полей аномалий средней месячной температуры по естественным ортогональным функциям. Труды ГГО, 1968, вып. 201, с. 14-51.
4. Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И. Естественные составляющие метеорологических полей. Гидрометеиздат, 1970, 198 с.
5. Обухова А.М. О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций. Изв. АН СССР, сер. геогр. физ., №3, 1960.

6. Савченко Е.И.,  
Каракаш Е.С. Применение метода разложения метеорологических полей по естественным составляющим для прогноза появления льда на реках Лене и Амуре. - Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып. 112, с. 3-16.
7. Юдин М.И. Физико-статистический метод долгосрочного прогноза погоды. Л., Гидрометеиздат, 1968, 28 с.
8. Юдин М.И.,  
Мещерская А.В. Некоторые оценки естественных составляющих как предикторов и предиктантов. - Труды ГГО, 1972, вып. 273, с. 3-15.



LANGFRISTIGE PROGNOSE VON NIEDRIGWASSERPERIODEN MIT DER ZEITEINHEIT 'MONAT'

R. C. Meier

ДОЛГОСРОЧНЫЕ ПРОГНОЗЫ ПЕРИОДОВ МЕЖЕНЕЙ С ЕДИНИЦЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ 'МЕСЯЦ'

Р. Ц. Майер

Zusammenfassung:

Eine langfristige Prognose von Niedrigwasserperioden wird verstanden als die Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsfunktion, daß an einer Flußstelle mit dem Monat  $m$  ( $m = 1, 2, \dots, 12$ ) eine Niedrigwasserperiode beginnt, daß diese  $z$  Monate dauert und ein Defizit von  $d$  cubm Wasser aufweist. Das hier angewandte Verfahren, die "experimentelle Methode", geht aus von einer Analyse und Simulation der beobachteten Zeitreihe mit mittleren Monatsabflüssen. Aus der simulierten Zeitreihe wird eine Stichprobe mit künstlich erzeugten Niedrigwasserperioden gezogen und dient zur Schätzung der unbekanntenen Wahrscheinlichkeiten, d.h. der Erstellung der gewünschten Prognose. In einer praktischen Anwendung werden Niedrigwasserperioden an 25 Abflußpegelstationen im Bayerischen Donau-Einzugsgebiet untersucht.

Резюме:

Под долгосрочным прогнозом периодов межени понимается установление вероятностной функции того, что в определенном месте реки в месяце  $m$  ( $m = 1, 2, \dots, 12$ ) начнется период межени, что он продлится 1 месяцев и что будет обнаружен дефицит воды в  $d$  куб. м. Примененный здесь метод, "экспериментальный метод", исходит из анализа и симуляции наблюдаемого временного ряда среднемесячных стоков. По симулированному ряду проводится проверка на выборку с искусственно вызванными периодами межени и служит для оценивания неизвестных вероятностей, т. е. для установления желаемых прогнозов. В одном практическом приложении исследуются периоды межени в баварском бассейне Дуная на 25-ти футштоковых измерительных станциях.

1. Einleitung

Je intensiver das Wasser eines Flusses, wie der Donau genutzt wird, desto abhängiger wird der Mensch von den Launen und Zufälligkeiten dieses Flusses, vor allem von dessen Hochwassern und Niedrigwasserperioden. Je öfter beispielsweise Kühlwasser entnommen wird, oder je mehr Brauchwasser und Abwärme eingeleitet wird, desto häufiger erweisen sich gerade Niedrigwasserperioden als der entscheidende Belastungsfall für den Betrieb solcher Anlagen. Daß damit auch immer häufiger eine Vorhersage von Niedrigwasserperioden als notwendig erkannt wird, dürfte nicht verwundern.

Im vorliegenden Referat soll eine Möglichkeit der langfristigen Vorhersage von Niedrigwasserperioden aufgezeigt werden, zunächst theoretisch und später in der Anwendung mit Abflußdaten von Flüssen aus dem Bayerischen Donau-Einzugsgebiet.

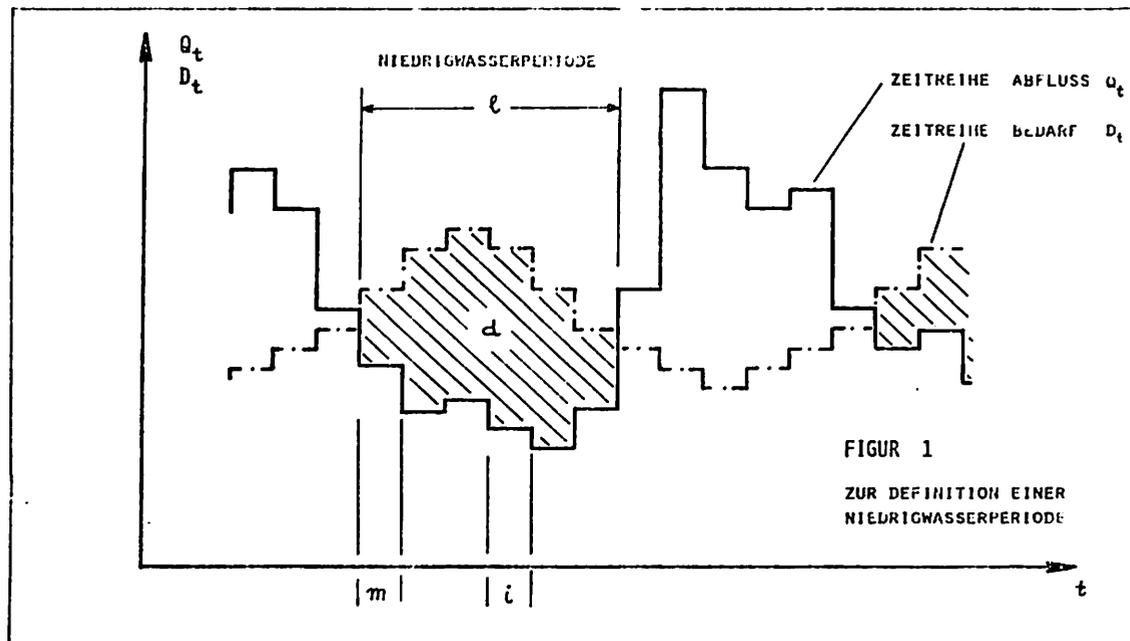
2. Theorie

Definitionen

Vorgegeben sei eine Flußstelle mit einer Zeitreihe von mittleren Abflüssen  $Q_i$  (Tages-, Monats-, Jahresabflüsse etc.). Die Zeitreihe sei abgeleitet aus einer beobachteten, kontinuierlichen Abflußzeitreihe durch deren Integration und Mittelung über Zeitintervalle  $i$  der Länge  $\Delta t$ .

Weiterhin sei vorgegeben eine zweite Zeitreihe 'Mittlerer Wasserbedarf  $D_i$ ' im Zeitintervall  $i$  mit Länge  $\Delta t$  (ebenfalls Tag, Monat, Jahr etc.).

Eine Verschneidung beider Zeitreihen (s. Figur 1) ergibt "positive runs" und "negative runs". Die negativen runs seien hier bezeichnet als Niedrigwasserperioden (NWP) und können verstanden werden als Zeitab-



schnitte, während derer die mittleren Abflüsse  $Q_i$  kleiner sind als der für diesen Zeitabschnitt vorgegebene Wasserbedarf  $D_i$ . Mit anderen Worten: Erreicht in einem vorgegebenen Zeitintervall  $i$  der Abfluß  $Q_i$  nicht den vorgegebenen Wasserbedarf  $D_i$ , so wird diese Zeitspanne als Teil einer NWP verstanden.

#### $\Delta t$ , die Zeitintervall-Länge und NWP-Kenngrößen

Für den weiteren Gang der Überlegungen ist die Wahl einer Zeitspanne  $\Delta t$  erforderlich und die Festlegung auf Kenngrößen zur Beschreibung von NWP. In der vorliegenden Studie soll gelten:

- a) Gewählt wird  $\Delta t$  zu einem Monat, d.h. es werden NWP aus Zeitreihen mit mittleren monatlichen Abflüssen, kurz Monatsabflüssen, untersucht.
- b) NWP sollen beschrieben werden durch:
  - $m$  = Beginn einer NWP im Monat  $m$  [ $m = 1, 2, \dots, 12$ ]
  - $\ell$  = Dauer einer NWP [Monate]
  - $d$  = Defizitvolumen einer NWP [cubm Wasser]

$$= \sum_{j=m}^{\ell+m-1} |Q_j - D_j| \quad \text{für } Q_j < D_j$$

Anfangsmonat, Dauer und Defizit einer NWP sind Zufallsgrößen, deren statistische Eigenschaften (z.B. Mittelwert, Varianz, Verteilung) von Interesse sein werden. Mit diesen Kenngrößen ist man im Stande, eine vergangene NWP an einer Flußstelle mit einem Zahlentriplett exakt zu beschreiben.

#### Formulierung der Prognoseaufgabe

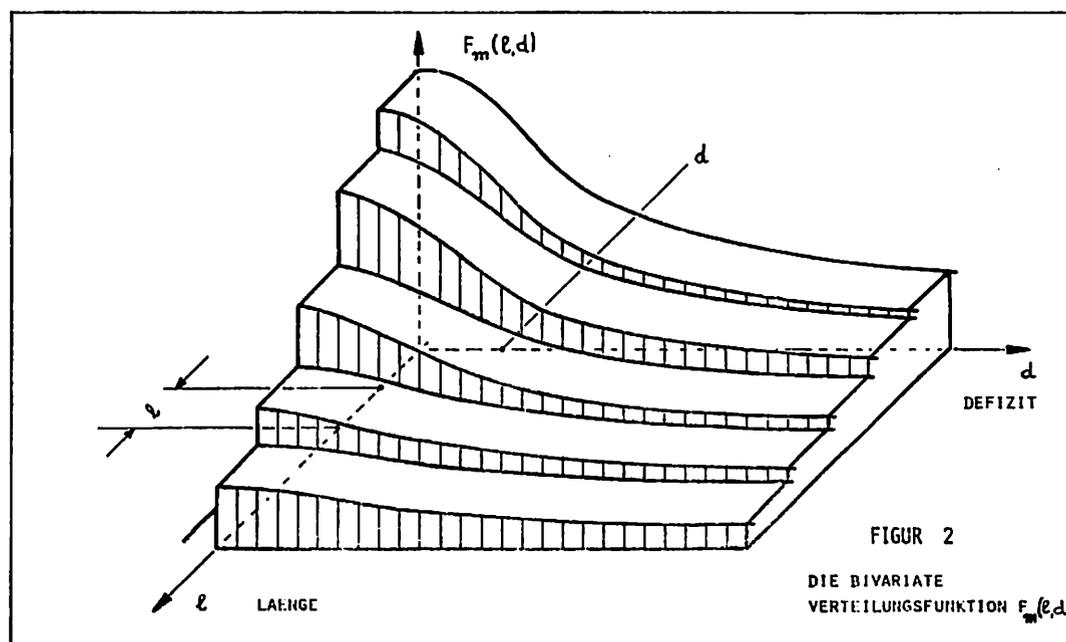
Eine Prognose künftiger NWP müßte eine Aussage erlauben, in welchen Monaten wir den Beginn einer NWP zu erwarten hätten, wie lange diese dann dauern und welches Defizit dabei wohl entstehen würde. Diese Aussage ist das Ziel der vorliegenden Untersuchung und soll wie folgt präzisiert werden:

Gesucht sei die Wahrscheinlichkeit, daß eine NWP beginnend im Monat  $m$  länger dauert als  $\ell$  Monate und ein Defizit aufweist, daß größer ist als  $d$  cubm Wasser.

Die gesuchte Wahrscheinlichkeit ist darstellbar als eine Verteilungsfunktion  $F_m(\ell, d)$  der beiden Zufalls-

variablen 'Länge L' und 'Defizit D' (s. Figur 2).

$$F_m(\ell, d) = P_m(L > \ell, D > d)$$



Zwei Beispiele für die Abfluß-Pegelstation Weilheim/Ammer:

Der Funktionswert  $F_9(6; 16 \text{ Mio}) = P_9(L > 6; D > 16 \text{ Mio}) = 0.01$  bedeutet als Prognose formuliert: Mit einer Wahrscheinlichkeit von nur 1 % beginnen dort im September ( $m = 9$ ) NWP, die länger dauern als 6 Monate und ein Defizit aufweisen, daß größer ist als 16 Mio cubm Wasser. Anders ausgedrückt, fast sicher (99 %) sind NWP, die im September beginnen, kürzer als 6 Monate und haben ein Defizit kleiner als 16 Mio cubm Wasser.

Der Funktionswert  $F_9(0; 0) = P_9(L > 0; D > 0)$  sagt aus, daß mit einer Wahrscheinlichkeit von 25 % in Weilheim an der Ammer NWP im September beginnen, gleich welcher Länge und welchen Defizites.

#### Schätzung der bivariaten Verteilungsfunktion $F_m(l, d)$

Die exakte Ermittlung der Verteilungsfunktion  $F_m(l, d)$  scheitert daran, daß es keine unendlich große Stichprobe mit beobachteten NWP gibt. Eine endliche Stichprobe mit  $n$  NWP ( $n > 0$ ) erlaubt lediglich eine mehr oder weniger gute Schätzung der unbekanntes Verteilungsfunktion  $F_m(l, d)$ . Jedoch ist auch dieser sonst übliche Weg (Berechnung einer Häufigkeitsfunktion über den Beobachtungspaaren  $(l, d)$  und Anpassung einer bivariaten Verteilung als Schätzung der unbekanntes Verteilungsfunktion) hier nicht passierbar, nämlich aus zwei Gründen:

- a) Aus der Beobachtung stammende Abflußzeitreihen mit vielleicht 50 oder gar 100 NWP sind für zuverlässige Prognosen dieser Art viel zu kurz, und
- b) scheidert bis heute die Anpassung einer bivariaten Verteilung an eine Häufigkeitsfunktion einer Stichprobe aus einer *n i c h t* normalverteilten zweidimensionalen Grundgesamtheit. Die Zufallsgröße Länge  $L$  und Defizit  $D$  sind zudem von ungleichem Typ: Die Größe  $L$  kann nur ganzzahlige Werte annehmen ( $l = 1, 2 \dots$ ), dagegen ist  $D$  eine kontinuierliche Größe (s. Figur 2).

Als Ausweg aus diesem Dilemma kann die "experimentelle Methode" helfen, deren Grundgedanke hier nur in aller Kürze dargestellt werden kann (s. z.B. Yevjevich 1972).

### Die "Experimentelle Methode"

Die beobachtete Zeitreihe (hier die Zeitreihe mit mittleren Monatsabflüssen) wird analysiert, um in einer Synthese ein stochastisches Simulationsmodell zu finden. Mit diesem Modell kann eine synthetische Zeitreihe von Monatsabflüssen erzeugt werden, deren Länge - im Vergleich zur beobachteten Reihe - beispielsweise die 10-fache Länge besitzt. Schließlich wird die simulierte Zeitreihe mit einer Zeitreihe 'Bedarf  $D_i$ ' geschnitten, und man erhält eine beliebig große Stichprobe von negativen runs, d.h. von NWP. Die daraus errechnete Häufigkeitsfunktion erlaubt die beliebig genaue Schätzung der unbekanntenen Verteilungsfunktion  $F_m(1,d)$ .

### 3. Anwendung

#### Vorarbeiten

Vor einer Umsetzung der theoretischen Überlegungen in ein lauffähiges Computerprogramm waren folgende Vorarbeiten zu leisten:

- a) Datensammlung: Es wurden Zeitreihen gesammelt vor allem von Abflußpegelstationen in Bayern (BRD) und in der Schweiz. Nach dem Aussortieren lückenhafter oder inhomogener Zeitreihen blieben unter anderem noch 25, hier explizierte Reihen übrig, deren Meßstellen an Flüssen im Bayerischen Donau-Einzugsgebiet gelegen sind. Deren Beobachtungslänge schwankt zwischen 32 und 58 Jahren.
- b) Mindestwasserbedarf  $D_i$ : In der vorliegenden Untersuchung wurde für  $D_i$  das pro Pegel jeweils errechnete langjährige Abflußmittel  $\bar{Q}$  gewählt:

$$D_i = \bar{Q} = \text{Constans}$$

- c) Zeitreihenmodell: Für die Anwendung der experimentellen Methode mußte ein konkretes Zeitreihenmodell gewählt werden. Als geeignet erwies sich für die Analyse und Synthese der meisten monatlichen Abfluß-Zeitreihen die autoregressiven Modelle erster oder zweiter Ordnung für  $Q_i$  oder - als Variante - für  $\ln(Q_i)$  (s. z.B. Roesner und Yevjevich 1966 oder Yevjevich 1972). Die Periodizität der Zeitreihe in Mittelwert und Streuung von  $Q_i$  wurde nachgebildet mit jeweils einer Fourierreihe, die dem autoregressiven Prozess aufgeprägt wurde.

Die Analyse mit einem der genannten Zeitreihenmodelle erlaubte für jede der 25 Zeitreihen die Simulation einer durchschnittlich 800 Jahre langen künstlichen Zeitreihe. Gekreuzt mit der Reihe 'Bedarf  $D_i = \bar{Q}$ ' ergab dieses Verfahren eine Menge von durchschnittlich 1 000 NWP pro Pegel. Sortiert nach Beginn ergaben sich für alle 25 Zeitreihen 25x12 Stichproben unterschiedlichen Umfanges, somit 25x12 Häufigkeitstafeln zur Abschätzung der Verteilungsfunktionen  $F_m(1,d)$ , außerdem 25 Mengen von diversen Kennwerten, die geeignet scheinen, die Struktur der jeweiligen Zeitreihe und das Niedrigwasser-Verhalten zu kennzeichnen (z.B. die durchschnittliche Anzahl von NWP pro Jahr).

#### Ergebnisse

Die Ergebnisse der Auswertung lassen sich am besten darstellen in einer Gegenüberstellung von zwei Gruppen von Abflußstationen, genannt Typ A und Typ B, die sich hinsichtlich der Zeitreihenstruktur und im NW-Verhalten unterscheiden.

Typ A: Die eine Gruppe, bezeichnet mit A, zeigt offenbar das Verhalten von Flüssen aus Einzugsgebieten mit geringerem Speicherungsvermögen (beispielsweise verursacht durch einen hohen Versiegelungsgrad). Deren Zeitreihen weisen nur schwach ausgeprägte Periodizitäten auf und sind in starkem Maß von Zu-

fälligkeiten geprägt, d.h. von vielen Schwankungen unter und über die gekreuzte Zeitreihe 'Bedarf  $D_i = \bar{Q}$ '. Diese Tatsache ist verantwortlich für mehrere NWP pro Jahr mit kurzer Dauer (ein oder zwei Monate) und verhältnismäßig geringem Defizit. Die Wahrscheinlichkeit, daß NWP jedes Jahr im gleichen Monat beginnen, ist gering. Mit anderen Worten, Prognosen von NWP dieses Typs sind relativ unsicher.

Typ B: Zeitreihen von Pegelstationen des Typs B charakterisieren augenscheinlich Flußregime, deren Einzugsgebiete ein sehr hohes Speichervermögen besitzen müssen (z.B. infolge Schneeretention, Bewaldung etc.). Dieses Retentionsvermögen dürfte verantwortlich sein für die meist sehr stark ausgeprägte Periodizität in den Zeitreihen dieses Typs mit einer deutlich ausgeprägten Spitze im Jahreszyklus. Dementsprechend ist pro Jahr meist nur eine NWP von langer Dauer (6 bis 7 Monate) und großem Defizitvolumen zu erwarten. Sie beginnt mit großer Wahrscheinlichkeit jedes Jahr im gleichen Monat und erlaubt damit deren relativ sichere Prognose.

Mischtypen, d.h. Pegelstationen, deren Abfluß- und NW-Verhalten zwischen Typ A und B einzuordnen wären, konnten bei den 25 untersuchten Pegelstationen aus dem Bayerischen Donau-Einzugsgebiet nicht gefunden werden.

Weitere Untersuchungen sind geplant - auch mit mittleren Tagesabflüssen - und sollen helfen, die bislang eher empirisch gefundenen Differenzierungsmöglichkeiten zu präzisieren. Generelles Ziel bleibt jedoch eine Verbesserung der langfristigen Vorhersage von Niedrigwasserperioden.

#### L i t e r a t u r h i n w e i s e:

1. Roesner, L.A.                      Mathematical models for time series of monthly precipitation and monthly runoff.  
Yevjevich, V.                      Hydrology Papers, No. 15, Colorado State University, 1966.
2. Yevjevich, V.                      Stochastic processes in hydrology.  
Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, 1972.

Anmerkungen: Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die diese Untersuchungen gefördert hat.

Die umfangreichen Berechnungen wurden in ALGOL 60 am Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München (TR 440) durchgeführt.



АНАЛИЗ МЕЖЕНИ РЕКИ САВЫ С ЦЕЛЬЮ ЕГО ПРОГНОЗА

О. Боначи

ANALYSE DER NIEDRIGWASSER DER SAWE FÜR DIE  
ERSTELLUNG VON NIEDRIGWASSERPROGNOSEN

Bonači O.

Резюме

В докладе обработанные гидрологические данные семи водомерных постов вдоль течения реки Савы. Целью обработки является определение характеристик явлений меженного стока и их повторяемость во пространстве и времени. Основной же задачей является прогнозирование меженного стока детерминистическим и вероятностным методами. Особое внимание уделено анализу явления меженного стока изучением потоков событий во временном ряде. Формированием искусственных рядов, исследованы максимально возможные явления меженного стока, все еще имеющие реального смысла. Анализированы убывающие ряды гидрографов, а прогностические зависимости даются в следующем виде:

$$K_t = e^{-\alpha t} + \beta .$$

Zusammenfassung

Im Referat sind die Angaben von sieben Pegeln am Fluß Save verarbeitet worden. Das Ziel war die Feststellung charakteristischer Erscheinungen des Niedrigwassers und seiner Häufigkeit in Abhängigkeit von Zeit und Ort. Die Hauptaufgabe war die Vorhersage des Niedrigwasserabflusses nach deterministischen und probabilistischen Methoden. Es wurden auch künstliche Reihen gebildet und die noch möglichen Niedrigwasserabflüsse untersucht. Es wurden Trockenwetterauslauf-Ganglinien analysiert und auf Grund derselben ist man zu den prognostischen Abhängigkeiten folgender Form gekommen:

$$K_t = e^{-\alpha t} + \beta .$$

В докладе дано обозрение результатов большой научной работы, опубликованной под заглавием "Разработка научно-технического прогноза межня и перемена качества воды реки Савы". В дальнейшем тексте будут показаны самые важные результаты и описаны интересные и необычные методы, на базе которых проведен анализ.

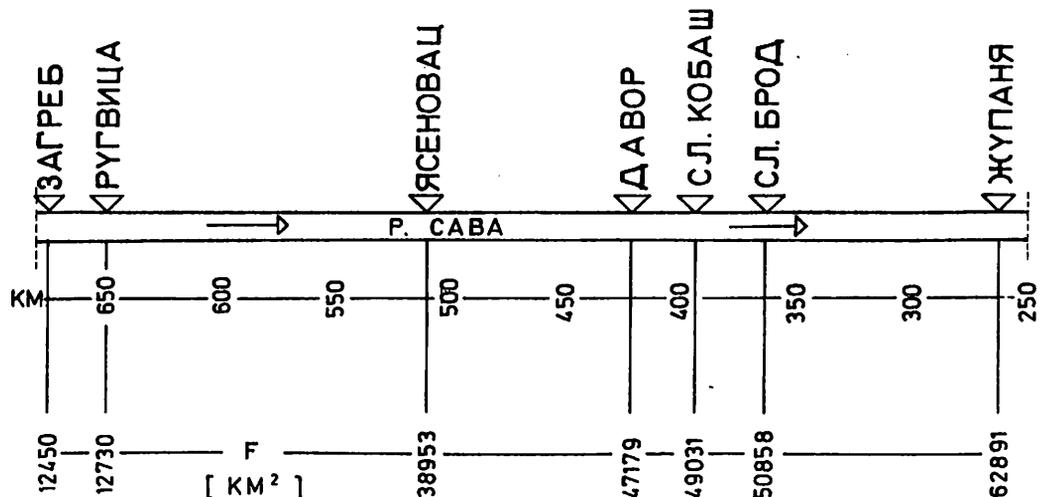


РИС. 1

На рис. 1 схематически показана часть течения реки Савы, анализированной в назначенной работе. Теми же методами рассмотрены семь водомерных постов, предложенных на рисунке 1. В продолжении доклада будут описаны результаты анализа, проведенного на водомерном посту Загреб.

Проблема появления межня, а так же и определение самого понятия межня, тесно связано с феноменом засухи. В настоящее время изучение засухи с основной задачей ее прогноза относится к самым важным вопросам гидрометеорологической науки.

Определить понятие засухи очень трудно и практически невозможно. В наших рассуждениях мы пошли от предположения, что засуха является абсолютной категорией. Рассматривать засуху как относительное явление, принимая во внимание все большую и большую надобность в воде, может быть полезным только в том случае, когда подробно изучаются системы эксплуатации воды. В гидрометеорологических работах засуха считается случайным (стохастическим) явлением, так как ни один проведенный до настоящего времени анализ не мог доказать присутствие цикла либо тренда в ее появлении. При предложении случайного появления периодов засухи единственным возможным методом ее изучения и прогноза являются методы вероятности и математической статистики.

Совпадают ли периоды недостачи атмосферных осадков с периодами недостачи расхода воды и в какой степени - это первый важный вопрос. Взаимоотношение этих двух феноменов ясно, но количественная связь еще не рассмотрена в достаточной мере. На их отношение влияет большое число физико-географических факторов водосбора, а это делает невозможным обобщение и требует анализа каждого отдельного бассейна реки.

С целью разъяснения этой проблемы рассчитаны индексы Пальмера и индексы расхода, которые охватывают время в 50 лет (1925 - 1974). Индекс Пальмера определяет уровень влажности либо суши на территории Загреба за каждый отдельный месяц. Это делается на основании сложного и продолжительного расчета, принимая во внимание следующие гидрометеорологические параметры: эвапотранспирацию, влажность почвы, расход воды, потерю воды в почве и количество атмосферных осадков. Подробности расчета индекса Пальмера находятся в литературе (1). Индекс расхода является количественным показателем абсолютного состояния влаги или суши в отношении всего анализированного периода времени на определенном посту и определен следующим уравнением:

$$IQ_i = \sum_{P=1}^{P=i-11} A_P \left( \frac{\bar{Q}_P}{Q^m} - 1 \right) \quad [1]$$

$A_P$  - это коэффициент (тяжесть), которым аналитически определяется влияние среднемесячного расхода предыдущих месяцев при формировании индекса расхода. Коэффициент уменьшается при удалении от того месяца, за который определяется индекс расхода.

В таблице 1 даны численные данные  $A_P$ , определенные на базе подробных исследований.  $Q_i$  - это среднемесячный расход  $i$ -того месяца.  $Q^m$  - это медиана, установленная на 50-летний период среднемесячных расходов реки Савы на водомерном посту Загреб.

РЕА. БР.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$f$	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$A_P$	3	2	15	1	6	6	4	2	1	1	1	1

ТАБЛИЦА 1

Из выражения 1 видно, что на формирование индекса расхода влияют 12 месяцев. Месяц, для которого индекс вычисляется, оказывает самое сильное влияние - его коэффициент  $A_p$  равняется 3. Все предыдущие месяцы имеют меньшие коэффициенты, поэтому они и меньше влияют на индекс расхода. Чтобы получить представление о взаимоотношении индекса IP, IQ на рис.2 показаны их размеры от января 1971 года до сентября 1974 года. На том же рисунке показаны данные среднемесячного расхода и медианы, а видно и соответствие индекса IP и IQ при продолжительных периодах засухи и влажности. При кратковременных же периодах индекс Пальмера остается почти тем же.

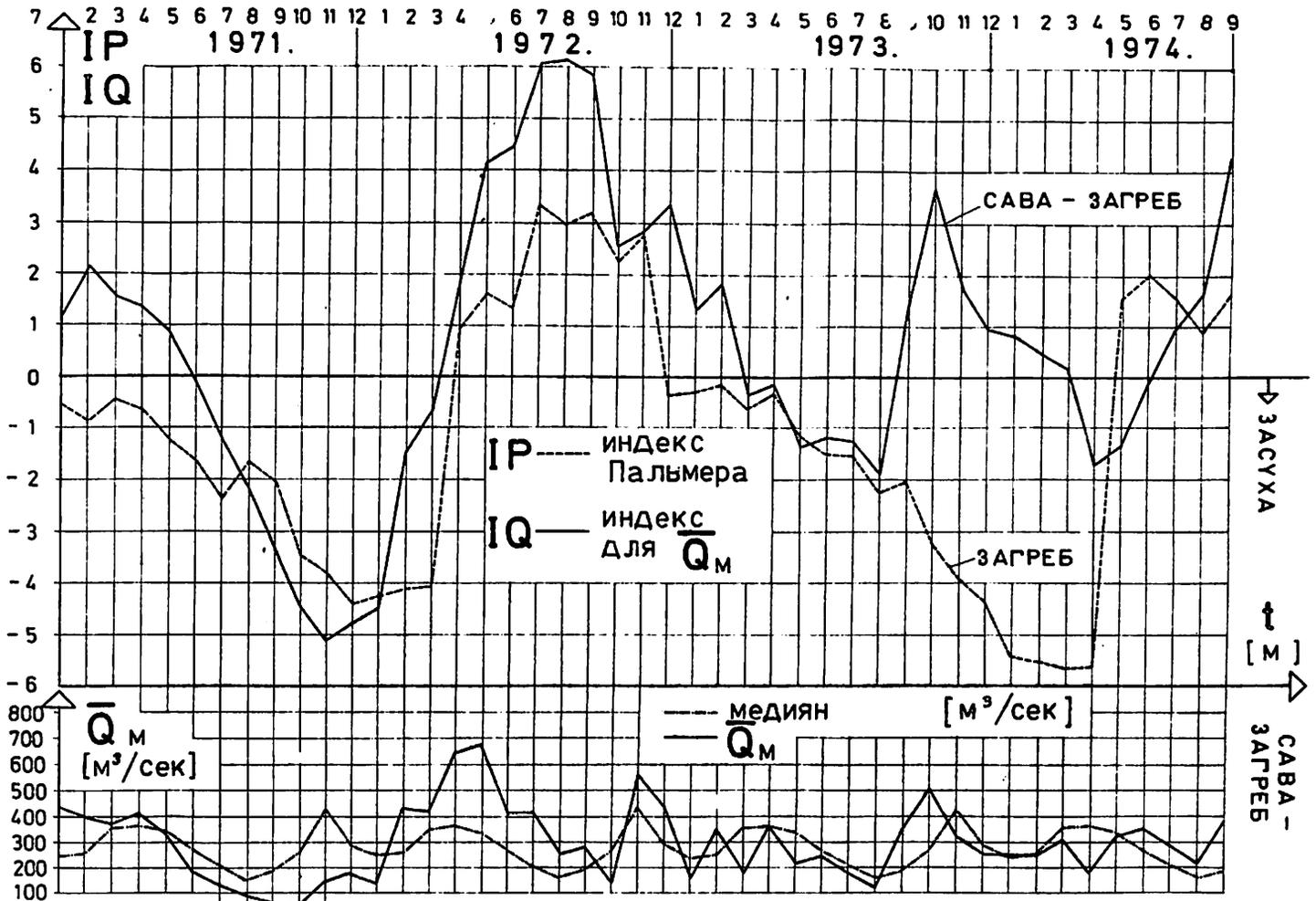


РИС. 2

На взаимоотношение осадков, павших на почву и тех, которые текут по рекам, значительно влияют географическо-физические и гидрометеорологические факторы водосбора. Наша задача - это установление тех факторов, которые больше всех влияют на означенное взаимоотношение. В таблицу 2 вписаны среднемесячные осадки и среднемесячные температуры Любланы в течение 1925 - 1960 годов. Осадки этой территории больше всего влияют на расходы реки Савы у вододержного поста Загреб.

ЛЮБЛЯНА (1925 - 1960.)		
М.	P [мм]	T [°C]
I	89	-1.8
II	82	0.3
III	49	4.8
IV	108	9.7
V	130	14.1
VI	137	17.8
VII	110	19.8
VIII	125	19.8
IX	100	15.2
X	105	9.9
XI	142	5.0
XII	122	0.0

ТАБЛИЦА 2

Если рассматривать взаимоотношение коэффициента стока и температуры воздуха за каждый отдельный месяц года в течении многих лет (1925 - 1960), то бросается в глаза их значительная зависимость. Графическое показание дано на рис.3. Плотность связи увеличивается в случае если в отношении с коэффициентом стока входит температура предыдущего месяца по выражению:

$$T'_i = \frac{1}{2} (T_i + T_{i-1}) \quad [2]$$

Коэффициент линейной корреляции  $r = -0.29$ ,  $r = -0.65$  до известной степени смущают. Коэффициенты корреляции кажутся меньшими из-за того, что расстояние чисел на абсциссе и ординате очень различно. Интервал на абсциссе в 20 раз больше чем интервал на ординате. Когда расчет проводится с релятивными отношениями, то получаются новые исправленные коэффициенты корреляции. Влияние температуры на анализированные взаимоотношения является самым важным.

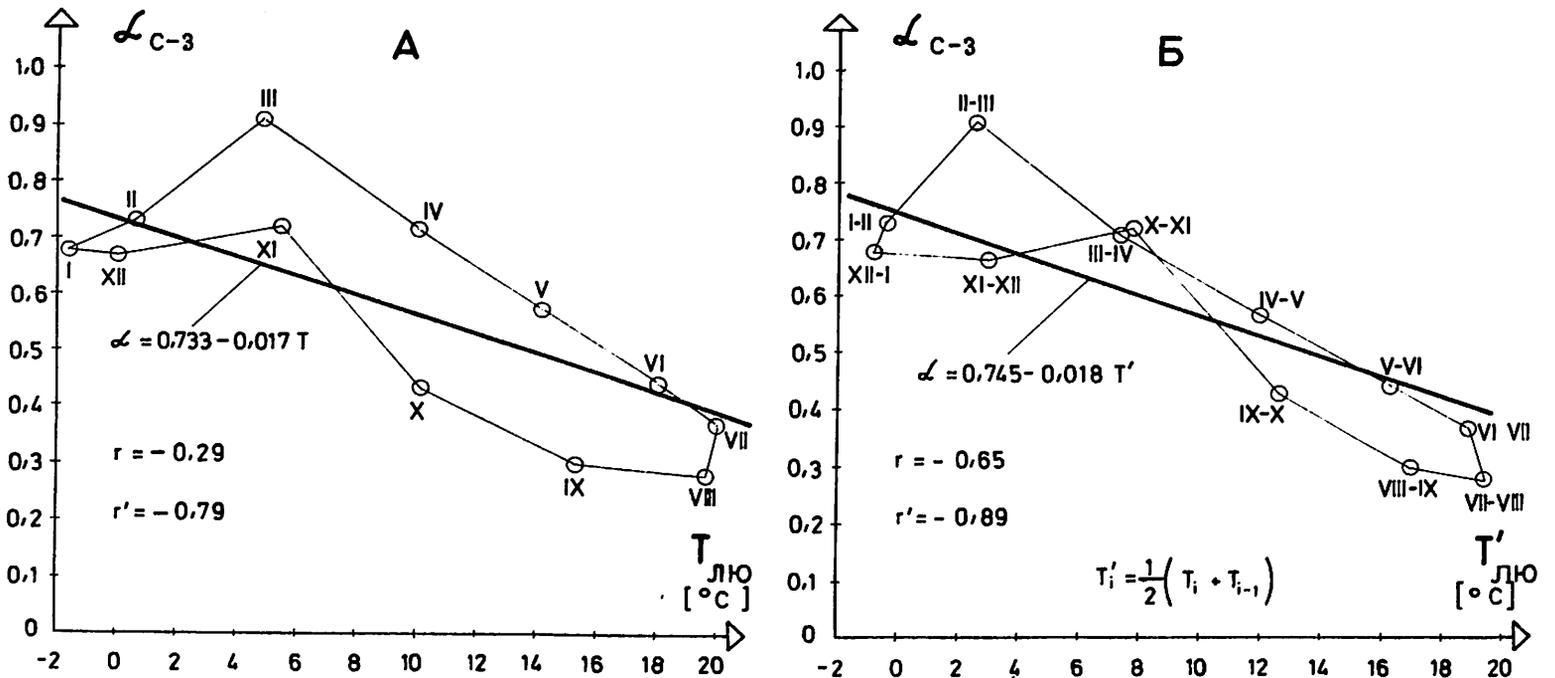


РИС. 3

Интересно для изучения считается продолжительность периодов без осадков и их вероятность в различные месяцы года. Принимая во внимание, что наступление дождей в определенный день нельзя считать случайным явлением (в строго статистическом смысле), самым простым является предположение, что наступление дождей зависит от того, что происходило в предыдущий день, т.е. был ли дождливый или сухой день. Это предположение, имеющее смысл в физике, дает возможность применения процесса Маркова. В наших анализах как день без осадков тот день, когда осадки были меньше 1 мм. На рис. 4 показаны кривые обеспеченности дней, без осадков в климатическом посту Загреб. Теоретические кривые получены применением статистической модели процесса Маркова 1-го порядка. На рисунке 4 видно, что самым продолжительным периодом без осадков является время от октября до марта. В теплом периоде года интервалы без осадков значительно короче, но вследствие влияния температура засуха появляется чаще.

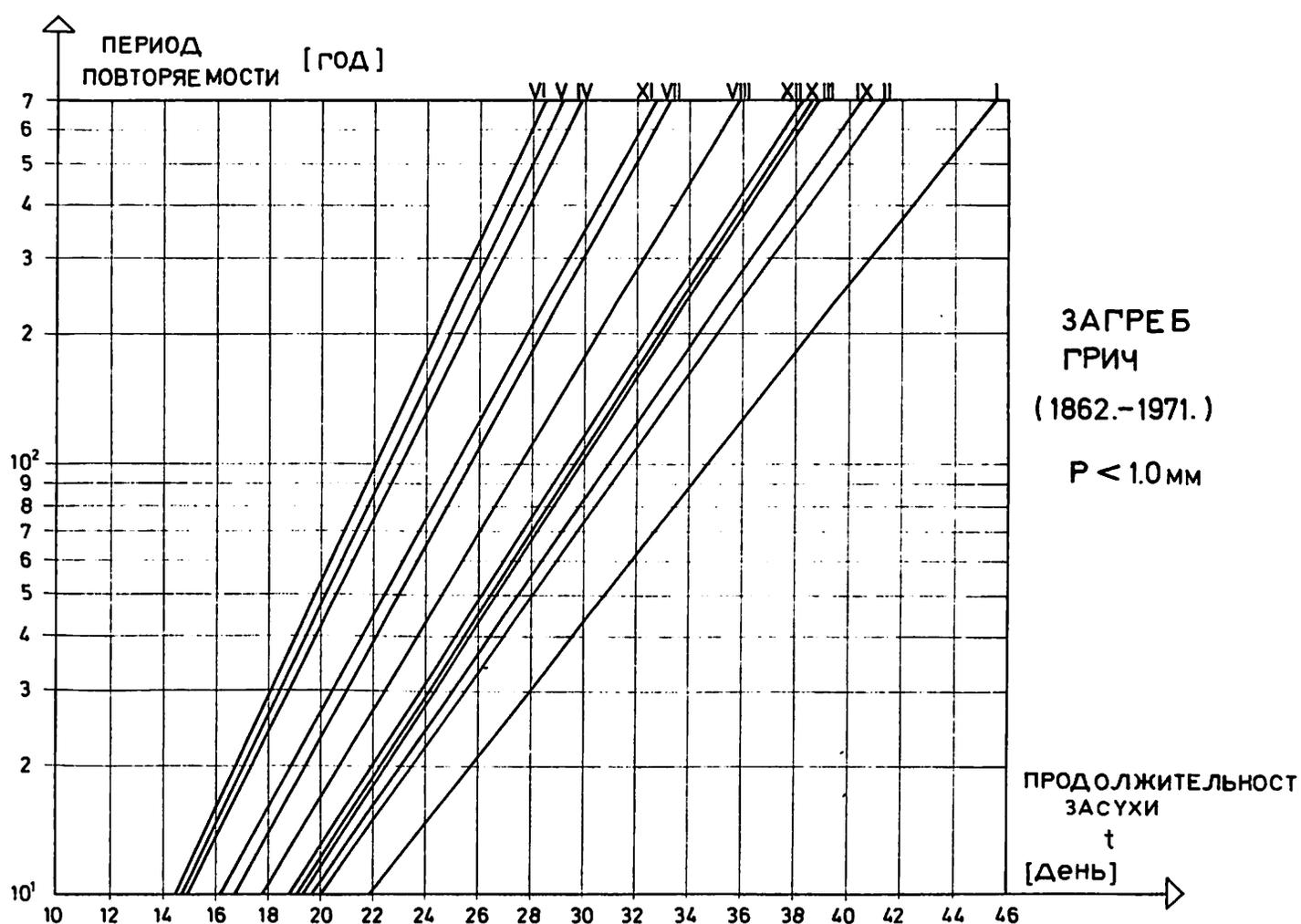


РИС. 4

Ряд среднемесячного расхода Савы в водомерном посту Загреб в течение 47 лет анализирован как поток событий. Поток событий определяется как последовательность событий, наступающих одно за другим в случайные моменты времени.

Во первых высчитано число осуществленных событий в строго определенном интервале времени. Во вторых сосчитаны интервалы времени проходящие между событиями, которые следуют за другом. Как осуществление событий считается появление среднемесячного расхода, который меньше определенного количества. Схематический показатель обоих анализов дан на рис.5.

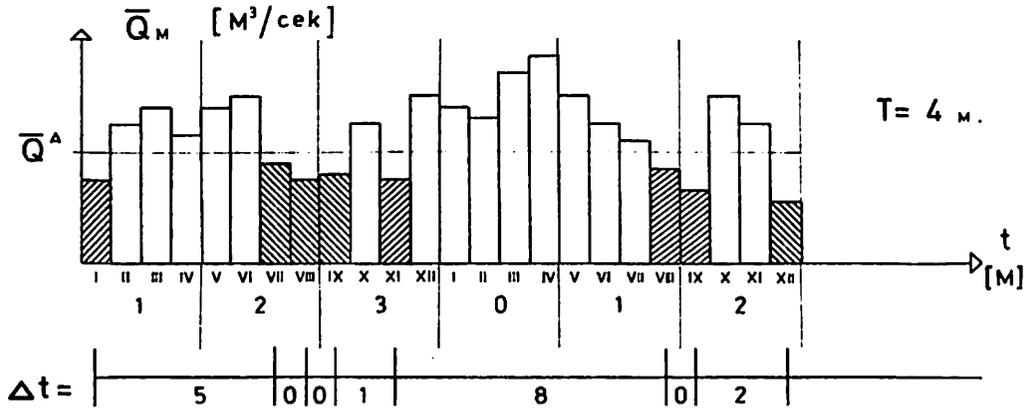


РИС . 5

На рис.6 начерчены эмпирические кривые частоты числа событий в отдельных интервалах. Взяты 4 (четыре) интервала продолжительности 4, 6, 9, 12 месяцев. Так же начерчено и осуществление расходов меньших чем 252 м³/сек и 126 м³/сек. При низком расходе в 126 м³ в секунду эмпирическая кривая частоты очень наклонена в лево, а при высшем расходе в 250 м³ в секунду та же кривая является симметричной.

САВА - ЗАГРЕБ

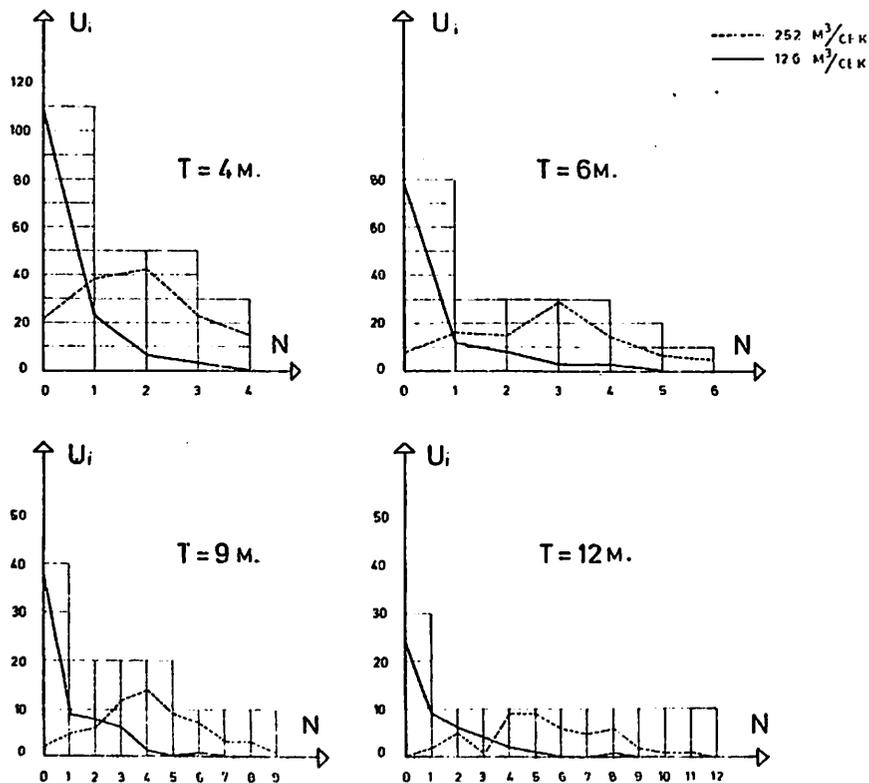


РИС. 6

На рис. 7 показаны кривые отношений средних  $K$  - месячных расходов и числа месяцев  $K$  в водохранилище Загреб. Начерчены 6 кривых за 6 периодов повторяемости от 5 до 1 000 годов. Кривые получены употреблением логарифмическо-нормального распределения на эмпирические данные в течение 47 лет.

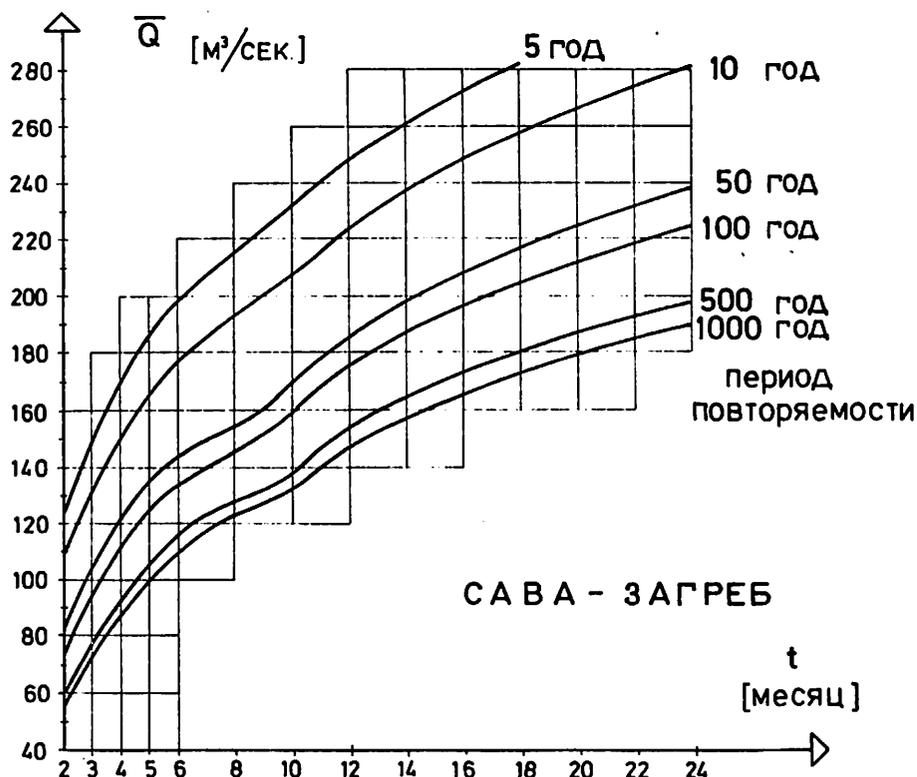


РИС. 7

Необходимо знать, какие меженно можно в действительности ожидать, несмотря на время их появления и их период повторяемости. Расчет проведен формированием синтетических рядов среднегодовых расходов и сравнением их с действительными расходами. Первый синтетический ряд сделан так, что сопоставлены среднемесячные расходы в порядке уменьшения за каждый отдельный месяц. Сделано вычисление среднемесячных расходов по строкам, а полученная сумма разделена на 12. Остальные 3 синтетические ряды получены тем же методом, но за средне-двумесечные, тремесечные и четверомесечные расходы. Обзор самых низких синтетических и эмпирических частей рядов находится на рисунке 8. На рисунке показаны две эмпирические кривые потому, что взяты во внимание все скользящие годы. Этот подход к проблеме анализа редких гидрологических явлений существенно различается от обычного анализа путем кривых обеспеченностей.

Особенное внимание было обращено на изучение гидрографа в период без осадков, когда расход в реке подкармывается подземным стоком. Употреблено следующее трехпараметрическое аналитическое выражение:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t + \beta}$$

[3]

которое трансформированием  $K = \frac{Q_t}{Q_0}$  [4]

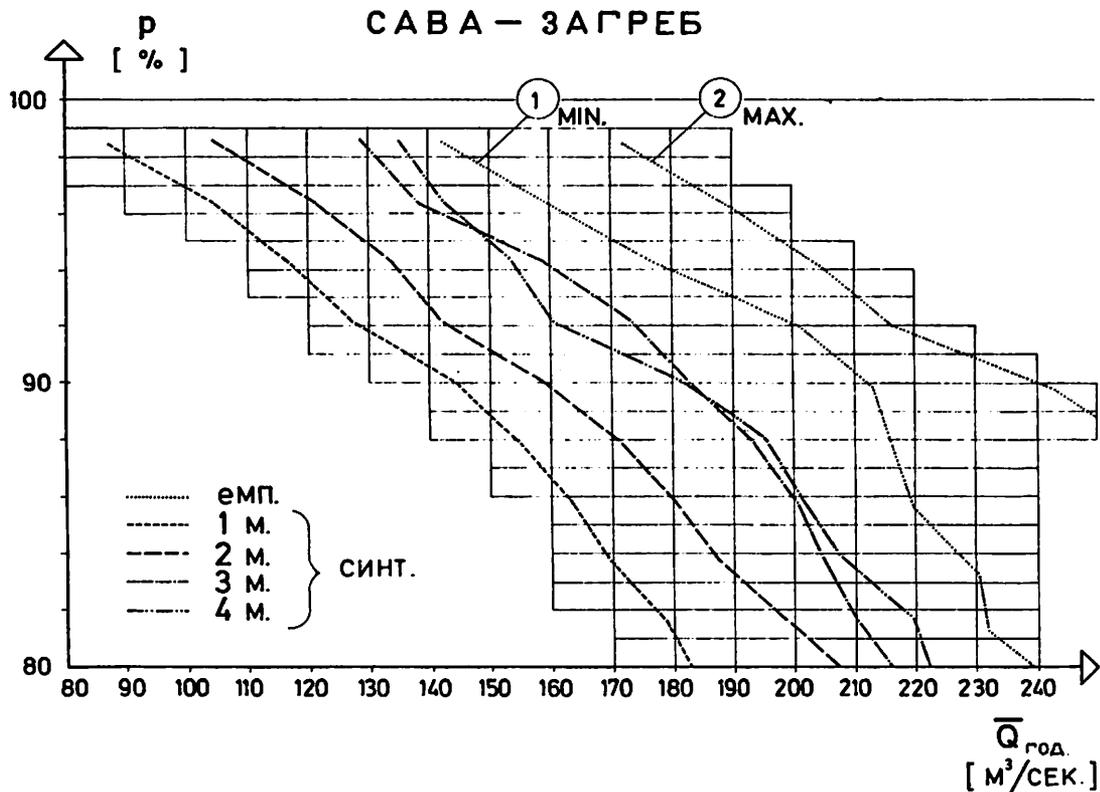
переходит в следующую формулу:  $K_t = e^{-\alpha t + \beta}$  [5]

Логарифмированием этого выражения получается уравнение прямой с целью упростить труд в связи с обработкой данных. Параметры  $\alpha$  и  $\beta$  определяются изучением их отношения к  $K_t$ , при чем  $t$  это число дней, у которых отношения

$$\alpha = f(K_t) \quad [6]$$

$$\beta = f(K_t) \quad [7]$$

являются самыми постоянными.



На рисунке 9 показаны эти взаимоотношения для реки Савы водомерного поста Загреб. Оптимальное число дней было 30. Зная вышеозначенные отношения можно в любое время дать для наступающих дней прогноз расхода, но при условии если бы не было осадков.

С целью облекчения поступка прогнозирования, на рисунке 10 начерчены кривые для выражения (5) для Савы водомерного поста Загреб. На основании этих кривых можно прочесть модуль расхода. Зная  $Q_0$  определяется расход в следующем периоде времени.

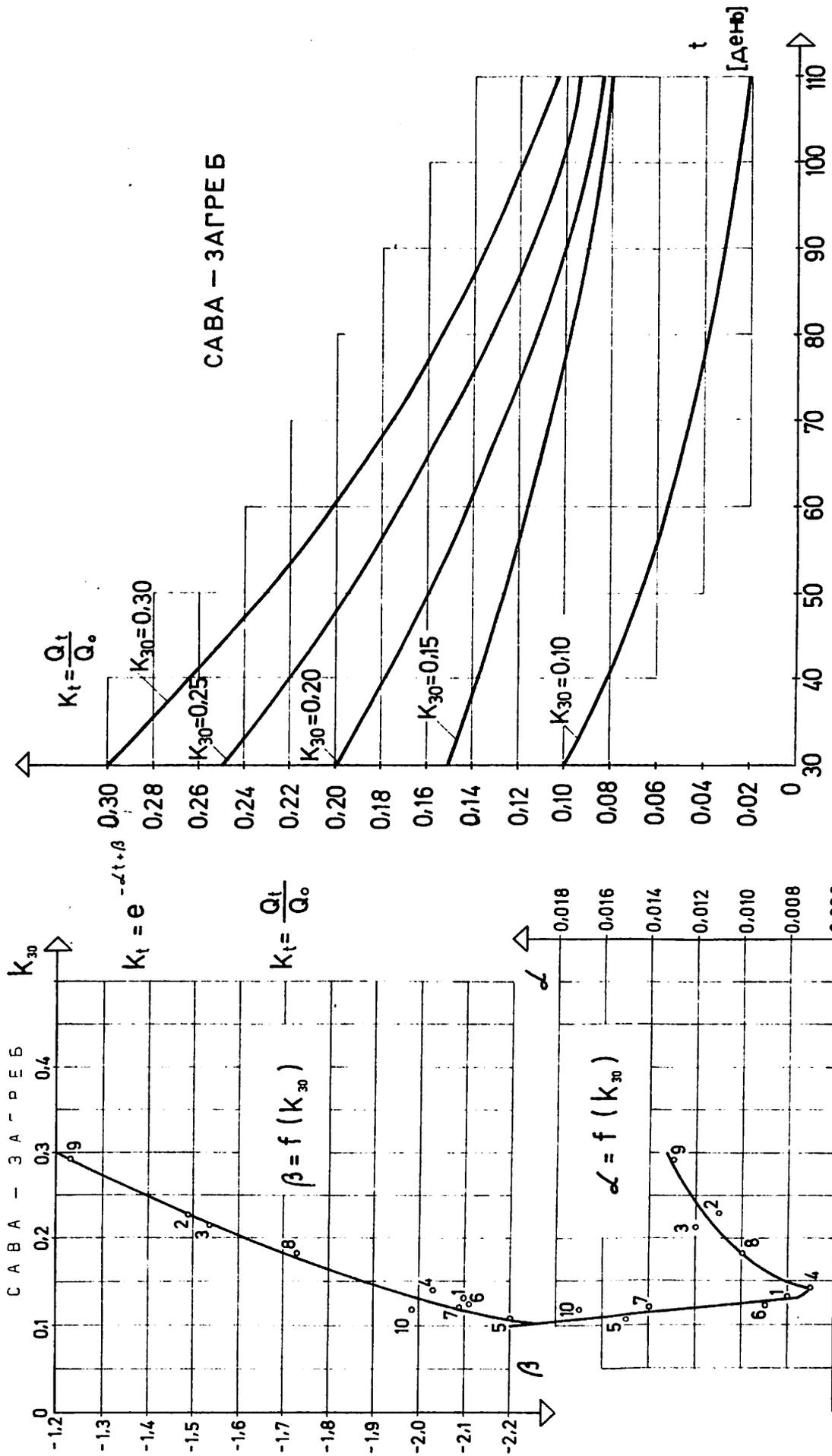


РИС. 10

РИС. 9

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Palmer W.C. Meteorological Drought. US Weather Bureau, Technical Paper Nr. 45, Washington, D.C., US Dept of Commerce, 58 pp, 1965.
2. Курдов А.Г. Минимальный сток рек. Издательство Воронежского университета, Воронеж, 1970
3. Jurčec V., Juras J. Statistička analiza sušnih razdoblja u gornjem slivu rijeke Save, Zagreb, 1974.
4. Penzar B. Sušna razdoblja u sjevernoj Hrvatskoj, Zagreb, 1974.

## 7. DISKUSSION

### Podani:

Zu den Ausführungen von Herrn Meier möchte ich bemerken, daß die Defizitberechnungen nur erstellt werden können, wenn der deterministische Teil in der Zeit konstant ist, d.h. wenn keine neuen Speicher vorhanden sind. Dann erhalten wir zweidimensionale Wahrscheinlichkeiten.

Es empfiehlt sich, die Angaben über Defizite in der Sommer- und Winterperiode einzeln als unterschiedliche stochastische Reihen zu berücksichtigen.

Es empfiehlt sich weiter, die Angaben über Defizite im Form von Verteilungskurven zu bearbeiten für die Versorgung verschiedener Verbraucher (verschiedene Berechnungsverläßlichkeiten).

### Meier:

Die Niedrigwasserperioden sind in meinem Referat definiert als negative runs aus einer Verschneidung von zwei Zeitreihen. Die erste ist die Abflußzeitreihe, die als eine Reihe verstanden werden soll aus einem stochastischen Prozess eines natürlichen, d.h. vom Menschen unbeeinflußten Abflußregime; vom Speicher beeinflusste Abflußregime werden also nicht berücksichtigt. Die zweite Zeitreihe ist eine Wasserbedarfslinie, die deterministisch zu verstehen ist.

### Afanasiev:

Zum Vortrag von Bonacci: Aus welchem Grunde wurde die Meßstelle Zagreb ausgewählt? Wegen ihrer praktischen Bedeutung oder wegen methodischer Schwierigkeiten bei der Forschungsarbeit im ganzen Save-Becken?

### Bonacci:

Im Vortrag wurden sieben Wassermessstellen behandelt, die sich in der Sozialistischen Republik Kroatien befinden. Zagreb war nur die erste, Žipana die letzte Meßstelle. Die Arbeitsmethoden aller Wassermessstellen sind die gleichen.

### Streil:

Bezüglich des Vortrages von Herrn Meier halte ich es wie Herr Podani für zweckmäßig, den variablen Bedarf nicht zur Definition und Auswertung der Niedrigwasserperioden heranzuziehen. In diesem Zusammenhang weise ich auf meine frühere Arbeit hin, über die ich vor 9 Jahren ebenfalls hier in Regensburg vorgetragen habe. Ich habe ein Verfahren beschrieben, wie die Abflußfüllen-Fehlbeträge (-Defizite) zu bestimmten Abflußschwellen, ihre durchschnittliche Länge und Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt werden können. Das Verfahren wurde an einer beobachteten, also nicht nur simulierten, 120-jährigen Reihe dargestellt. Es wurde unter dem Titel: "Die Erweiterung der statistischen Auswertung von Abflußbeobachtungen durch die Einbeziehung der Fülle" als Nr. 28 der "Besonderen Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch" veröffentlicht.

### Meier:

Zur Frage von Herrn Streil läßt sich folgendes erwidern:

1. Ich sehe hier einen Widerspruch. Herr Streil hält es für unzulässig, den (variablen) Bedarf zur Auswertung von Niedrigwasserperioden (NWP) heranzuziehen, gebraucht aber in dieser seiner Kritik und seiner Arbeit unter dem Namen "Abflußschwelle  $Q$ " dennoch eine Abflußhöhe, deren Unterschreitung einen "Abflußhöhenfehlbetrag  $S^-$ " (=Defizit) und eine "Unterschreitungsdauer  $T^-$ " (=Länge einer NWP) ergibt. Sein Verdienst ist es, solche Untersuchungen für verschieden Abflußschwellen durchgeführt zu haben ( $Q = 20, 25, 30 \dots 100 \text{ m}^3/\text{sec}$ ), wohingegen in der von mir vorgelegten Arbeit nur eine Unterschreitungsgrenze, das langjährige Abflußmittel einer Pegelmeßstelle, herangezogen wurde.

2. Das Ziel der von Herrn Streil zitierten Arbeit ist ein anderes als das in meiner Untersuchung. Streil erhält zu einer bestimmten Abflußschwelle  $Q$  eine Stichprobe von Abflußfüllenfehlbeträgen  $S_i^-$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), errechnet eine **monovariante** empirische Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen  $S^-$  und ordnet jedem Wert  $S_i^-$  eine **durchschnittliche** Unterschreitungsdauer zu.

Ziel meiner Arbeit war eine **bivariate** (gleichfalls empirische) Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen Defizit (= Abflußfüllenfehlbetrag) und Dauer einer NWP (= Unterschreitungsdauer) zu erstellen. Stichproben für diese Variablen habe ich sowohl aus beobachteten als auch aus simulierten Zeitreihen gewonnen. Die Simulation von Zeitreihen war deswegen notwendig, weil die Stichproben aus beobachteten Zeitreihen für bivariate Verteilungen zu klein sind.

Prohaska:

1. Mit welchen tatsächlichen Größen des kleinsten Niederwasserstandes wurde gearbeitet - wenn dies ein absoluter Wert oder ein Mittelwert irgendeines Zeitabschnittes ist - und welche Reihenlänge wurde benutzt?
2. Wurden bei der Auswertung der Abhängigkeitswerte der Trend der Veränderung der Niederwasserstände im jugoslawischen Donauabschnitt berücksichtigt, d.h. am Wassermeßpunkt Bogojewo, der schon seit langem von einer Reihe jugoslawischer Spezialisten festgestellt wurde? Wenn ja, welches Merkmal und welchen Charakter hat er bei Ihnen? Wenn nein, welche Bedeutung haben dann jetzt die von Ihnen vorgeschlagenen Abhängigkeiten?
3. Warum arbeiten Sie gerade mit den Wasserständen, wenn diese unter den gegenwärtigen Bedingungen der Ausnutzung von Wasserreserven (ich denke an die Regulierung des Flußbettes) einen relativen Wert haben? Mir scheint, man arbeitet besser mit den Größen des minimalen Abflusses, oder soll man auch zu den Wasserständen zurückkehren?

Dementjew:

- Zu 1.: Bei der Auswertung wurden die absoluten Werte der minimalen monatlichen Wasserstände in der Niedrigwasserperiode während einer 30-jährigen Beobachtungsreihe von 1941 - 1970 angewandt.
- Zu 2.: Bei der Aufstellung der Abhängigkeitswerte zwischen den Wasserständen wurde der Trend der niedrigsten Wasserstände am Meßpunkt Bogojewo augenscheinlich nicht berücksichtigt. Außer den Abhängigkeitsverhältnissen zwischen den minimalen Wasserständen wurden die Abhängigkeitswerte für die geringsten Abflüsse mit dem darauffolgenden Übergang zu den Wasserständen aufgestellt, bei denen eine Trendstatistik nicht erforderlich ist.
3. Bei derartigen Untersuchungen ist es zweckmäßiger, nicht die Wasserstände heranzuziehen, sondern die Abflüsse, besonders unter den Bedingungen der Wasserspiegelregulierung. Dennoch ist es bei den ständigen Zusammenhängen zwischen dem Wasserniveau und dem Abfluß durchaus möglich, die niedrigsten monatlichen Niederwasserstände auszuwerten.

Podani:

Zu Herrn Bonacci: ich halte derartige Untersuchungen für sehr nützlich und empfehle dem Autor, sie unter Berücksichtigung statistischer Daten in einem nicht verzerrten Zeitraum fortzusetzen und ebenso die gewonnenen Trockenwetterganglinien mit den tatsächlichen Daten zu vergleichen.

Bonacci:

Ich bedanke mich bei Herrn Podani. Jetzt kann man nur noch eins sagen, daß aufgrund der gewonnenen Trockenwetterganglinien eine Vorhersage gegeben wird, und wir werden in der Praxis sehen, wie ihre Qualität sein wird.

Parschin:

Ich würde gerne einen kleinen Vorschlag zu den interessanten Forschungen von Herrn Bonacci machen. Soweit ich verstanden habe, ergibt sich die Prognose der Wasserstände aufgrund der Trockenwetterganglinien unter Berücksichtigung der Grundbedingungen. Fernerhin wäre es wünschenswert, jede Trockenwetterganglinie in ihrem wahrscheinlichen Aussehen vorzulegen; denn dann könnte man Wasserstände verschiedener Wahrscheinlichkeit bestimmen, was für die praktische Anwendung wichtig ist.

Prohaska:

Ich danke dem Kollegen Dementjew für die sehr nützliche Information, aber darauf bezog sich meine Frage nicht. Ich dachte daran, wie nun die Zuverlässigkeit der von Ihnen vorgeschlagenen Abhängigkeitsbeziehungen ist, wenn Sie, wie Sie sagten, den Trend des Wechsels der Niederwasserstände im jugoslawischen Donaugebiet nicht berücksichtigt haben?

Robinson:

Herrn Meier möchte ich fragen: Ist das sog. Thomas-Fiering-Modell für monatliche Abflußsimulation berücksichtigt worden?

Meier:

Das Thomas-Fiering-Modell ist im Prinzip nichts anderes als ein autoregressives Modell erster Ordnung für die Zeitreihe  $X_i = \frac{Q_{i,m} - Q_m}{S_m}$  ( $(Q_{i,m} = \text{mittlerer Abfluß im Monat } i, m \text{ (} i = 1, \dots, n, m = 1 \dots 12),$

$Q_m = \text{Monatsmittel für den Monat } m, S_m = \text{Streuung der Monatsabflüsse im Monat } m)$ ). Mit anderen Worten, das Thomas-Fiering-Modell filtert die Periodizität im Mittelwert und Streuung mit der Transformationsvorschrift  $X_i = (Q_{i,m} - \bar{Q}_m) / s_m$  aus und bestimmt für  $X_i$  die Parameter des autoregressiven Prozesses erster Ordnung.

In dem vor mir verwendeten Verfahren wird die Periodizität in Mittelwert und Streuung mit einer ähnlichen Transformation ausgefiltert. Der einzige Unterschied besteht darin, daß  $\bar{Q}_m$  (bzw.  $s_m$ ) durch Fourierreihen  $\bar{Q}_i$  (bzw.  $s_i$ ) ersetzt werden. Das Filter (d.h. die Transformationsvorschrift) ist dann richtig berechnet, wenn die Autokorrelationsfunktion der periodenfren Zeitreihe  $X_i$  ebenfalls aperiodisch ist. (Die Signifikanz wurde im Frequenzbereich anhand eines Vertrauensbereiches überprüft). Das bedeutet: Der von Monat zu Monat variierende Autokorrelationskoeffizient der ursprünglichen Zeitreihe  $Q_{i,m}$  ist impliziert im Filtermodell der Fourierreihe berücksichtigt.

Thiess:

1. Der von Herrn Meier verwendete autoregressive Prozeß ist m.E. korrekter als die herkömmliche Simulation mit Zufallszahlen, da es meines Wissens nach keine zweidimensionalen Zufallszahlen gibt, für keine der herkömmlichen Verteilungsarten.

Man müßte sich, wollte man so eine Simulation durchführen, in den beiden Hauptrichtungen der gemeinsamen Verteilung der beiden Zufallsgrößen für jeweils eine Art der Verteilung entscheiden. Dieses Vorhaben scheitert meistens am viel zu geringen Umfang der Stichprobe.

2. Wenn der empirische "Häufigkeitsdom", d.h. die zweidimensionale Dichteverteilung der Stichprobe, die bei Herrn Meier in der einen Richtung stetig, in der anderen diskret verläuft, in beiden Richtungen diskretisiert wäre, könnte auch über die bedingte Wahrscheinlichkeiten der zweidimensionalen Zufallsgröße leichter ausgesagt werden.

## 7. Д И С К У С С И Я

### Подани:

Расчеты по дефицитам можно сделать только, если детерминистическая часть постоянна, т.е. если не имеются новые водохранилища. Тогда имеем двухмерные вероятности.

Рекомендуется отдельно учитывать дефициты летнего и зимнего периодов, как разные стохастические ряды.

Рекомендуется обрабатывать данные о дефицитах в виде кривых распределения для удовлетворения различных потребителей (разные расчетные обеспеченности).

### Мейер:

Периоды межений определены в моем реферате как отрицательные истечения из разреза двух временных рядов. Первый является временным рядом стока, который должен быть понят как ряд из стохастического процесса естественного, т.е. без влияния человека, режима стока; влияния хранилищ на режимов стока, значит, не учитывались. Второй временной ряд является линией надобности воды, который понимается как детерминистический.

### Афанасьев:

К докладу Боначи: По какой причине выбран пост Загреб? По причине практической его важности, или из-за методических трудностей исследования по всему бассейну Савы?

### Боначи:

В докладе обработано 7 водных постов, находящихся в Социалистической Республике Хорватии. Загреб был только первым, а Жипана - последним водным постом. Методы обработки всех постов являются теми же самыми.

### Штрейль:

В отношении доклада господина Мейера я, также как и господин Подани, считаю целесообразным не привлекать переменные потребности к определению и обобщению межених периодов. В связи с этим я указываю на свою, ранее выполненную работу, о которой я докладывал 9 лет тому назад здесь же в Регенсбурге. Я описал в ней способ установления недостатков полноты стоков (дефициты) для определенных сточных порогов, их средней длины и вероятности поступления. Способ был получен вследствие наблюдения, значит, не только с помощью моделированного, двадцатилетнего ряда. Он был опубликован под титулом: "Расширение статистических оценок наблюдений стоков посредством приобщения полноты", как №28 "Особых сообщений к Немецкому гидрологическому ежегоднику".

### Мейер:

По поводу вопроса господина Штрейля напрашивается следующее возражение:

1. Я вижу в этом противоречие. Господин Штрейль считает нецелесообразным привлекать (изменяющую потребность для оценки периодов межених (ПМ), хотя в этой своей критике и в своей работе под заголовком "Сточный порог  $Q$ " он тем не менее использует высоту стока, сокращение которой дает "недочет в высоте стока  $S^-$  (=дефицит) и сокращенное время  $T^-$ " (=длина одного ПМ). Именно его заслугой является проведение таких исследований для разных порогов стока ( $Q = 20, 25, 30, \dots, 100 \text{ м}^3/\text{сек}$ , в то время как в работе, предложенной мною, употребляется лишь одно число превышений - средний многолетний сток одного водомерного поста.

2. Цель работы, процитированной Штрейлем, иная, чем цель моих исследований. К определенному порогу стока  $Q$  Штрейль получает выборочную пробу недочета наполняемого стока  $S_i^-$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), рассчитывает **м о н о в а р и а ц и о н н у ю** эмпирическую функцию распределения случайных переменных  $S^-$  и придает каждому значению  $S_i^-$  среднее значение продолжительности непревышений.

Целью моей работы было установление **б и в а р и а н т н о й** (эмпирической) функции распределения случайных переменных дефицита (= недочет в наполнения стока) и времени одного ПМ (= продолжительность непревышений). Выборочные пробы для этих переменных я получил как из наблюдаемых, так и из смоделированных временных рядов. Симуляция временных рядов была необходима по той причине, что выборочные пробы из наблюдаемых временных рядов были слишком малы для бивариантных распределений.

#### Прохаска:

1. С какими же действительными величинами наименьшего уровня Вы работали - если это абсолютное значение или среднее значение какого-то периода - и какую длину ряда Вы использовали?

2. Если Вы при разработке Ваших зависимостей учитывали тренд изменения низких уровней на югославском участке Дуная, т.е. на водном пункте Богоево, который уже давно констатирован рядом югославских специалистов. Если есть, какого знака и характера он у Вас есть? Если Вы это не имели в виду, какого теперь назначения предложенных Вами зависимостей?

3. Почему Вы работаете прямо с уровнями, когда они имеют в современных условиях использования водных ресурсов (имею в виду регулирование речного русла) относительный характер? Мне кажется лучше работать с величинами минимального расхода а также возвратиться к уровням?

#### Дементьев:

1. В разработке использовались абсолютные значения минимальных месячных уровней за период межени за тридцатилетний ряд наблюдений с 1941 по 1970 гг.

2. В построении зависимостей между уровнями тренд низших уровней по пункту Богоево в явном виде не учитывался. Кроме зависимостей между минимальными уровнями построены зависимости для наименьших расходов с последующим переходом к уровням, в которых учет тренда не требуется.

3. В подобных исследованиях более целесообразно пользоваться не уровнями воды, а расходами, особенно в условиях регулирования уровней. Однако, при устойчивых связях между уровнем и расходом воды, вполне возможно использование наинизших месячных уровней.

#### Подани:

Считаю такие исследования очень полезными и рекомендую автору продолжить их с учетом статистических данных на неискаженном периоде, а также сопоставлять полученные кривые истощения с реальными данными.

#### Боначи:

Благодарю господина Подани. Теперь можно сказать только то, что полученным кривым дается прогноз и мы на практике увидим каково будет его качество.

Паршин:

Предложение: Я хотел бы сделать небольшое предложение к интересным исследованиям господина Боначи. Как я понял, прогноз уровней дается по кривым истощения с учетом начальных условий. В дальнейшем желательно было бы каждую кривую истощения представлять в вероятностном виде. Тогда можно было бы определять уровни различной вероятности, что важно для практического использования.

Прохаска:

Я благодарю коллега Дементьева за очень полезную информацию, но мой вопрос не был в этом отношении. Я имел в виду, какова теперь надежность предложенных Вами зависимостей, если, как Вы сказали, не учитывали тренд изменения низких уровней на югославском участке Дуная?

Робинзон:

Господина Мейера я хотел бы спросить: Учитывалась ли так называемая модель Томаса-Фиринга для месячного симуляции стока?

Мейер:

В принципе модель Томаса-Фиринга является не чем иным, как авторегрессивной моделью первого порядка для временного ряда 
$$x_i = \frac{Q_{i,m} - Q_m}{S_m} \quad ((Q_{i,m} = \text{средний сток в течении}$$
 месяца  $i$ ,  $m$  ( $i = 1, \dots, n$ ,  $m = 1, \dots, 12$ ),  $Q_m = \text{среднемесячное значение для месяца } m$ ,  $S_m = \text{рассеивание месячного стока в месяце } m$ )). Другими словами: модель Томаса-Фиринга фильтрует периодичность в среднем значении и рассеивание по предписанию для преобразования  $X_i = (Q_{i,m} - \bar{Q}_m) / S_m$ , и определяет для  $X_i$  параметр авторегрессивного процесса первого порядка.

В примененном мною методе среднее значение и рассеивание периодичности фильтруются подобным же преобразованием. Единственное отличие заключается в том, что  $\bar{Q}_m$  (или  $S_m$ ) заменяются рядами Фурье  $\bar{Q}_i$  (или  $S_i$ ). Фильтр (т.е. предписания для преобразования) тогда правильно рассчитан, когда автокорреляционная функция временного ряда  $X_i$  с отсутствующей периодичностью тоже аперiodична. (Зигнификация была проверена в частотной области с помощью доверительной области). Это означает: автокорреляционный коэффициент первоначального временного ряда  $Q_{i,m}$  полностью учтен в фильтрообразной модели ряда Фурье.

Тисс:

Авторегрессивный процесс, примененный господином Мейером, является более точным, чем обычном моделированием со случайными числами, т.к. согласно моим знаниям, 2-пространственных случайных чисел не существует, причем ни для каких обычных видов распределения.

При желании провести подобное моделирование необходимо решиться на оба главных направления совместного распределения обоих случайных величин для каждого отдельного вида распределения. Этот замысел проваливается чаще всего вследствие слишком малого охвата выборочной проверки.

Если эмпирический "частотный купол", т.е. 2-пространственное распределение выборочных проб, которое у господина Мейера в одном направлении протекало непрерывно, а в другом направлении дискретно, был бы дискретизирован в обоих направлениях, можно было бы легче высказаться и об условных вероятностях 2-пространственных случайных величин.

**"Vorhersage von Eiserscheinungen"**

**"Прогноз ледовых явлений"**



## ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДОКЛАД

## GENERALBERICHT

## Прогнозы ледовых явлений на Дунае

Гинзбург Б.М.

## Vorhersagen der Eisverhältnisse der Donau

Ginzburg B.M.

Увеличение объема перевозок по Дунаю водным транспортом обуславливает необходимость максимального использования навигационного периода. Между тем, ледовый режим реки отличается большой изменчивостью: в 15% зим на реке вообще не бывает льда, в 40% наблюдается только ледоход, но в суровые зимы продолжительность ледостава достигает трех месяцев, а замерзание и вскрытие реки сопровождается опасными заторами льда. Поэтому особенно возрастает значение прогнозов ледовых явлений. Изменяется качественный состав флота, все больше становится мощных самоходных судов, способных работать во льду. Возникает потребность в прогнозах нарастания и убывания толщины и прочности льда для обеспечения продления навигации во льду. Новые задачи возникают и в связи со строительством гидротехнических сооружений на Дунае и связанными с ним изменениями ледового режима.

Рассмотрим существующие в настоящее время общие научные основы ледовых прогнозов, состояние и перспективы их применения к прогнозам по Дунаю.

Проблема ледовых прогнозов состоит из двух основных частей. Первая часть - исследование физики ледовых процессов, нахождение достаточно точных и применимых в практике методов расчета ледовых явлений по данным гидрологических и метеорологических наблюдений. Вторая часть - собственно проблема прогноза, неизбежно включающая способы учета метеорологических условий, которые будут иметь место в период от момента выпуска прогноза до осуществления предсказываемого явления.

Начиная с 1930-ых годов и до последнего времени в расчетах и прогнозах ледовых явлений во многих странах широко применяются простые расчетные схемы, в которых теплообмен через водную или снежно-ледяную поверхности выражается через среднюю суточную температуру воздуха. В целом за период охлаждения воды или нарастания льда он характеризуется суммой градусо-дней мороза, а за период таяния льда - суммой градусо-дней тепла. При наличии наблюдений выведение параметров эмпирических расчетных уравнений для каждого объекта в отдельности учитывает в скрытом виде его гидрологические и климатические особенности, что обеспечивает обычно удовлетворительную точность расчета. Такие приемы применяются для краткосрочных прогнозов появления льда, начала ледостава и начала весеннего ледохода на Дунае (1, 2, 3, 4, 5). Однако именно на Дунае, где часты резкие колебания температуры воздуха в период замерзания реки при ее большом теплозапасе, необходим более точный расчет теплообмена, а в весенний период - учет вариации прочности ледяного покрова. К тому же подобный подход не позволяет рассчитывать элементы ледового режима в условиях регулирования реки гидротехническими сооружениями.

Исследования советских гидрофизиков и гидрологов позволили в последнее десятилетие перейти к применению общих методов расчетов, обеспечивающих их высокую точность и пригодных для любых водных объектов.

Наиболее совершенный метод расчета появления льда и начала ледостава предложен проф. Шуляковским (6, 7). Основные его положения докладывались на III, IV, VI конференциях придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Напомним, что условие начала ледообразования выражается неравенством

$$\vartheta_n \leq - \frac{\beta_n}{\alpha_n} \quad [1]$$

где  $\vartheta$  - средняя в сечении температура воды,  $\beta$  - суммарный поток тепла от водной поверхности (излучение, испарение, конвективный теплообмен с воздухом),  $\alpha$  - Коэффициент подачи тепла из водной массы к поверхности. Индекс "n" означает, что все величины относятся к моменту начала ледообразования. Высокая точность достигается за счет определения коэффициента  $\alpha$  для тонкого поверхностного слоя воды, а также в результате расчета охлаждения воды до  $\vartheta_n$  с учетом всех основных элементов теплообмена воды с окружающей средой на пути ее движения в русле реки. Важным достижением Шуляковского было получение эмпирической формулы

$$\alpha = (1660\vartheta + 170W)ср$$

для вычисления коэффициента в зависимости от скорости течения  $V$ (м/с), скорости ветра  $W$  и физических констант воды - плотности  $\rho$  и теплоемкости  $c$ .

Условиями начала ледостава на реке являются накопление достаточного количества плавучего льда и интенсивная теплоотдача, при которой смерзание льдин способно противостоять влекущей силе потока. Эти условия выражаются эмпирической формулой

$$\Theta_{кр} = -6,5 v^2 \left( \frac{b}{\sum \Theta_-} \right)^{0,8} \quad [2]$$

где  $\Theta_{кр}$  - критическая (наивысшая, при которой возможно образование ледостава) средняя суточная температура воздуха в день замерзания;  $b$  - ширина реки и  $\sum \Theta_-$  - сумма отрицательных средних суточных температур воздуха со дня появления льда.

Расчеты выполняются последовательно для каждого дня охлаждения воды, пока не будет выполнено условие [1], а затем для каждого дня ледохода, пока температура воздуха не окажется ниже  $\Theta_{кр}$  по [2].

Этот метод, в частности, применен для советского участка Дуная (8). Погрешности расчетов в 87% случаев не превышают одного и в 97% случаев - двух дней.

Применение предложенного Л.Г.Шуляковским подхода к определению теплообмена позволило разработать новый метод расчета движения кромки льда в нижних бьефах гидроузлов (10). Установлено, что кромка льда перемещается вверх по течению при условии

$$0,14 \frac{\alpha^2}{v^4} > 1 \quad [3]$$

и скорость ее движения  $U_k$  приближенно выражается простой формулой

$$U_k = -0,054 \cdot 10^{-3} \Theta \left[ 0,14 \frac{\alpha^2}{v^4} - 1 \right] \quad [4]$$

где  $\alpha$  - длина участка ледообразования в км,  $v$  - скорость течения в м/с,  $\Theta$  - температура воздуха на пути движения воды в градусах.

Л.Г.Шуляковский предложил и наиболее точный метод расчета толщины льда на водохранилищах в начале ледостава (11), когда существенное влияние на этот процесс имеет приток тепла из

сохраняющей еще заметный теплозапас водной массы к нижней поверхности льда. Расчет теплообмена на обеих поверхностях ледяного покрова выполняется весьма детально, что обеспечивает его высокую точность - средняя толщина льда в расчетном створе вычисляется с погрешностью, не превышающей в 88% случаев одного сантиметра (12). Для расчетов по этому методу разработаны алгоритм и программа расчета на ЭВМ М-222, позволившие применять его в оперативной практике и для исследовательских целей.

Для расчета нарастания льда при толщинах 15-20 см и больше целесообразно применять более простой, но достаточно точный метод проф. В.В.Пиотровича (13, 14). С использованием этих расчетных методов получены вероятностные характеристики режима нарастания льда на волжских водохранилищах (15). Такие характеристики позволяют определить технически и экономически обоснованные сроки, до которых может быть ежегодно гарантировано продление навигации. На этой конференции будут доложены результаты первых подобных расчетов для Дуная.

Значительные успехи достигнуты за последнее время в области расчетов таяния и разрушения ледяного покрова. С.Н.Булатовым (16) разработан физически обоснованный и точный метод расчета уменьшения толщины и прочности тающего льда. Суть его состоит в том, что за каждый день, начиная с момента схода снега на льду, вычисляется по данным метеорологических и гидрологических наблюдений толщина слоя льда, стаявшего с верхней и нижней поверхностями ледяного покрова, а также количество тепла солнечной радиации, поглощенное оставшейся массой льда ( $S$ ). Последнее определяет нарушение кристаллической структуры льда, приводящее к снижению его прочности. Относительное разрушающее напряжение на изгиб  $\varphi$  определяется по формуле

$$\varphi = \left( 1 - \sqrt{\frac{S}{S_0}} \right)^2 \quad [5]$$

где  $S_0$  - количество тепла солнечной радиации, при поглощении которого лед полностью теряет прочность. По экспериментальным данным  $S_0 = 44 \text{ кал/см}^3$ . Разрушающее лед усилие зависит от величины  $\varphi$  и толщины льда  $h_\lambda$  в соотношениях, соответствующих способу приложения этого усилия. Так для начала ветрового дрейфа льда на озерах и водохранилищах получено условие

$$\varphi h_\lambda^{1/2} = 0,018 \text{ W}^2 \quad [6]$$

Аналогично для определения уменьшения скорости движения ледокола в сплошном ледяном покрове по сравнению с движением по чистой воде ( $\Delta V_\lambda$ ) получена формула

$$\Delta V_\lambda^2 = 1,4 \varphi h_\lambda^{3/2} \quad [7]$$

Эти формулы дают возможность рассчитывать время вскрытия и очищения ото льда малопроточных водоемов и подойти к расчету оптимальных сроков начала движения судов определенных типов во льду (17).

Начатые Булатовым исследования по созданию общего метода расчета вскрытия рек уже на первом этапе (18) показали, что при всем разнообразии процесса вскрытия различных рек условием вскрытия в общем виде является выполнение неравенства

$$\varphi h_\lambda \leq f(\Delta H, H) \quad [8]$$

где  $H$  - уровень воды, а  $\Delta H$  - высота подъема уровня льда над береговым припаем.

Это условие пока выражается в форме эмпирических зависимостей, которые для ряда рек с различным соотношением влияния механического и теплового факторов вскрытия имеют вид квадратных парабол, что соответствует современным теоретическим представлениям о взаимодействии потока и ледяного покрова (19). Поэтому перспектива создания универсального метода рас-

чета вскрытия рек теперь вполне реальна. При этом же на нынешнем этапе работы видно, что расчет сроков вскрытия по новым зависимостям отличается высокой точностью.

Опираясь на определение прочности льда по методу Булатова, в самое последнее время удалось подойти к решению проблемы расчета заторных уровней. До сих пор подобные расчеты были возможны лишь для отдельных участков рек, где есть постоянные места образования заторов. В частности, такой метод был предложен проф. Ласлоффи для Среднего Дуная (20). Для низовьев реки, где условия образования заторов более разнообразны, удалось выявить лишь показатели вероятности опасных заторных уровней (21). Предлагаемое сейчас решение (22) основано на выявлении пределов соотношения значений характеристик толщины и прочности льда ( $\varphi h_A$ ) и расходов воды ( $Q$ ), при которых возможно образование заторов на данном участке реки, и установление эмпирической зависимости максимального заторного уровня ( $H_3$ ) от этих факторов

$$H_3 = f(\varphi h_A, Q) \quad [9]$$

На примерах таких разных рек, как Днестр и Амур, получены хорошие результаты.

Таким образом постепенно создается система довольно точных расчетов основных ледовых явлений на реках и водохранилищах.

Применение расчетных методов для целей прогнозов связано с использованием прогноза метеорологических элементов, в первую очередь температуры воздуха, а желательно также ветра и облачности. Такие прогнозы в Гидрометслужбе СССР составляются в осенний и весенний периоды специально для гидрологических прогнозов. Они даются ежедневно на 3-5 дней (по дням) для тех участков реки, где близятся ледовые явления. Использование этих прогнозов теоретически может снижать оправдываемость ледовых прогнозов примерно на 10% по сравнению с расчетом по фактическим данным. Однако многолетний опыт показывает, что на практике снижение намного меньше, так как обычно ледовый прогноз выпускается при оптимальной надежности прогноза погоды (иногда за счет некоторого уменьшения заблаговременности). За последние 10 лет оправдываемость краткосрочных прогнозов (по действующей оценке) составила для осенних ледовых явлений 91%, для вскрытия рек - 95%.

На основе расчетных методов можно было бы составлять и долгосрочные ледовые прогнозы, используя прогнозы погоды на месяц.

Однако при таком подходе сроки ледовых явлений определяются ожидаемыми колебаниями температуры воздуха, а это наименее достоверная часть месячного прогноза погоды. Проверка показала, что подобные способы не дают долгосрочному прогнозу заметного преимущества перед ориентировкой на средние многолетние сроки ледовых явлений (23).

В практике долгосрочных ледовых прогнозов уже давно широко применяются методы, основанные на исследовании атмосферных процессов, обуславливающих ледовые явления. Одновременные аномалии сроков ледовых явлений на реках охватывают большие территории, что отражает закономерную связь этих явлений с атмосферными процессами крупного масштаба (24). Поэтому в методике ледовых прогнозов можно опираться на характеристики преобладающих в период формирования ледовых явлений процессов в атмосфере и самые общие закономерности их развития, выявленные исследованиями по общей циркуляции атмосферы. К числу таких закономерностей относятся, например, однородность атмосферных процессов, преобладающих на протяжении синоптического сезона (по Б.П.Мультановскому и С.Т.Пагава), условия и тенденции их перестройки от сезона к сезону, устойчивость процессов формирования и разрушения Восточно-Сибирского антициклона и т.д. В методах долгосрочных ледовых прогнозов используются количественные характеристики процессов и физико-статистические зависимости, связывающие сроки ледовых явлений с этими характеристиками.

Прогнозы сроков замерзания и вскрытия рек и водохранилищ, составляемые по таким методам с заблаговременностью 1-2 месяца, имели для рек Советского Союза оправдываемость за последние 10 лет около 80%. Она выше на 20%, чем была при ориентировке на средние многолетние даты.

Применение такого рода подхода к долгосрочным прогнозам ледовых явлений на Дунае вполне целесообразно. Первые исследования в этом направлении показали, что главный показатель ледовых условий - продолжительность ледовых явлений в течение зимы - тесно связан с суровостью холодного сезона как для всего протяжения реки в целом (25, 26), так и для отдельных участков (27, 28, 29), а суровость зимы, в свою очередь, - с преобладающим характером атмосферной циркуляции. Суровые зимы обусловлены преобладанием меридиональной циркуляции, мягкие - зональной, причем наиболее существенно в суровые зимы развитие циркуляции центрального типа (по Г.Я.Вангенгейму) (25, 26).

Для долгосрочного прогноза ледовых условий на Дунае используется тот установленный рядом исследователей факт, что преобладающие в течение зимы процессы начинают формироваться уже в осенние месяцы. Так в работах (25, 29, 30) показано, что теплым и холодным зимам предшествуют существенно различные типы атмосферной циркуляции в Атлантико-европейском секторе в период с августа и до ноября. Примененные в этих работах характеристики процессов основаны на их типизации и носят качественно-количественный характер (соотношение повторяемости процессов различных типов).

Исследования по общей циркуляции атмосферы показывают необходимость учитывать особенности развития атмосферных процессов на всем Северном полушарии. В связи с этим в последние годы получили развитие исследования физико-статистических зависимостей сроков ледовых явлений от характеристик полей давления и температуры в предшествующие месяцы над различными секторами полушария.

Уже давно известны приемы выявления характерных районов, где учитываются величины аномалий давления или температуры воздуха, которые с помощью множественной корреляции связываются с прогнозируемыми явлениями (метод мировой погоды). Такого рода прием применен и для прогноза продолжительности ледовых явлений на Дунае (26). Получены удовлетворительные зависимости с учетом аномалий давления воздуха в десяти пунктах, расположенных в разных районах Северного полушария, за различные месяцы от января до октября. Интересно, что из этих пунктов лишь в двух, расположенных на Аляске и в Гренландии, давление учитывается за три месяца, что отражает большое влияние циркуляции в тихоокеанско-американском секторе.

В последние годы новые возможности открыло применение описания полей метеорологических элементов с помощью разложения их по естественным составляющим, число которых обычно сравнительно невелико (31). Установлена зависимость сроков замерзания многих рек от коэффициентов при основных или характерных составляющих полей аномалий давления и температуры воздуха за предшествующие месяцы в разных секторах Северного полушария (32, 33). Этот метод применен для прогноза продолжительности ледовых явлений на Дунае (34). Выявлено преобладающее влияние на нее характера поля аномалии давления воздуха над Канадой в октябре. С коэффициентами разложения этого поля по естественным составляющим получены удовлетворительные уравнения для всех незарегулированных участков Дуная.

В рамках исследований по долгосрочным прогнозам начато рассмотрение вопроса о влиянии солнечной активности на продолжительность ледовых явлений. Оказалось, что такое влияние наиболее заметно в экстремальные по ледовитости годы.

Таким образом для прогноза важнейшего в практическом отношении элемента ледового режима Дуная - продолжительности ледовых явлений - разработан ряд методов, учитывающих различные характеристики атмосферных процессов. Эти методы применяются или в известной мере учитываются

при составлении долгосрочных прогнозов, выпускаемых Дунайской обсерваторией. Прогнозы выпускаются в конце ноября и в последние годы неплохо оправдываются.

Разработанные и применяемые до настоящего времени методы прогнозов ледовых явлений на Дунае не включают прогнозов на участке, на который распространяется подпор от ГЭС Джердап у Железных ворот. Между тем, этот участок находится в середине транзитного транспортного пути по Дунаю, и изменение его ледового режима серьезно скажется на условиях судоходства. Уже первый опыт оценки изменения ледового режима Дуная в результате постройки каскада ГЭС (35) показал, что они будут значительными. Более обстоятельный расчет (9) позволил установить, что ледостав в озерной зоне водохранилища Джердап будет образовываться в 80% зим вместо примерно 40% в естественных условиях и средняя продолжительность его возрастает с 12 до 40 дней. В суровые зимы в зоне выклинивания подпора следует ожидать образования значительных заторов льда. Отсюда видно, насколько неотложна необходимость разработки методики прогнозов для этого участка реки.

Насколько последних зим отличались сравнительно легкими ледовыми условиями на Дунае, и это способствовало некоторому ослаблению внимания к ледовым прогнозам. По нашему мнению в настоящее время необходимо сосредоточить внимание на следующих направлениях исследований:

1. Применение современных методов расчета элементов ледового режима, прежде всего, для разработки методики краткосрочных и долгосрочных прогнозов для участка, ледовый режим которого изменился под влиянием создания ГЭС у Железных Ворот.
2. Выполнение работ по расчету режима и созданию методики прогнозов нарастания и разрушения ледяного покрова для целей продления навигации во льду в суровую зиму.
3. Использование современных методических возможностей для краткосрочных ледовых прогнозов, в том числе для разработки методики прогнозов заторов и заторных уровней.
4. Всестороннее исследование атмосферных процессов, обуславливающих ледовитость зимы на Дунае, с целью взаимоувязки имеющихся прогностических указаний и разработки комплексной методики долгосрочных прогнозов продолжительности ледовых явлений и ледостава, сроков их начала и окончания.

Предлагаемые исследования смогут быть наиболее эффективными как в научном, так и в практическом отношении, если они будут осуществляться в содружестве специалистов всех заинтересованных стран. Советские гидрологи готовы к такой совместной работе и рады будут применить в ней все имеющиеся у них знания и опыт.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Pázl J. Rezim ladov na Dunaji i jeho predpokladané zemny po vibudowani wodnich del. Vyrecha zprava. Vyskumny ustav Vodohospodarsky poločka. Bratislava, 1954, s. 33-84.
2. Mită P. Prognoza apartiei podului de gheată pe Dunărea inferioara. A III-a Conferință internațională de prognoze hidrologice a tărelor dimărene. Bucuresti, 1965, p. 23.
3. Csoma J. A Tisza jégjelenségeinek előrejelzése. Vizügyi közlemének. 1968 év 3 füzet. Budapest, s. 326-364.
4. Dumitresku V., Stan M. Prognoza dezghetului pe Dunare. Studii de hidrologia 1967. XXI.

5. Щербак А.В.,  
Солопенко Л.И. Осенне-зимний ледовый режим советского участка р.Дуная. Труды УкрНИГМИ, 1970, вып.97, с.70-83.
6. Шуляковский Л.Г. Появление льда и начало ледостава на реках, озерах и водохранилищах. Гидрометеиздат, М., 1960, с.216.
7. Шуляковский Л.Г.,  
Бусурина В.М. Расчет начала ледостава на реках в естественных условиях и в условиях регулирования стока. Труды Гидрометцентра СССР, вып.8, 1967, с.12-24.
8. Щербак А.В. Расчет времени появления плавучего льда на советском участке р.Дуная. Труды УкрНИГМИ, 1971, вып.104, с.
9. Miloradov V. Promene u rezimu nanosa leda na Dunava i pritokama pod uticajem sistema "Djerdap". Savetavanje o uticaju izgradnje hidroenergetskog i plovidbenog sistema "Djerdap" na razvoj privrede sz Szbije. Beograd, maja 1971, s.213-235.
10. Милошевич В.А. Расчет наступления кромки ледяного покрова в нижних бьефах водохранилищ. "Метеорология и гидрология", 1971, № 12.
11. Шуляковский Л.Г. К методике расчета толщины ледяного покрова на водохранилищах. Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып.112, с.50-63.
12. Андрианова Г.А.,  
Бусурина В.М. Расчет толщины ледяного покрова в начальный период ледостава на примере двух волжских водохранилищ. Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып.112, с.64-76.
13. Пиотрович В.В. Расчеты толщины ледяного покрова на водохранилищах по метеорологическим элементам. Труды Гидрометцентра СССР, 1968, вып.18, с.136.
14. Пиотрович В.В.(ред). Таблицы для расчета нарастания ледяного покрова с нижней поверхности и их применение. Изд. Гидрометцентра СССР, 1970, с.61.
15. Гинзбург Б.М.,  
Балашова и.в.,  
Пономарев М.Б. О расчетах и прогнозах нарастания льда на волжских водохранилищах для целей продления навигации. Труды Гидрометцентра СССР, 1975, вып.140, с.
16. Булатов С.Н. Расчет прочности тающего ледяного покрова и начала ветрового дрейфа льда. Труды Гидрометцентра СССР, вып.74, 1970, с.117.
17. Полякова К.Н. Возможность прогноза уменьшения прочности ледяного покрова весной на Волгоградском водохранилище для целей продления навигации. Труды Гидрометцентра СССР, 1975, вып.140.
18. Булатов С.Н. О возможности создания универсального метода расчета времени вскрытия рек. Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып.112, с.100-107
19. Шуляковский Л.Г. К модели процесса вскрытия рек. Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып.49, с.3-10.
20. Lászlóffy W. A jeges arvizek magassága. Beszámola a Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet 1956. Evi munkájáról. Budapest, 1957, s.75-84, 271.
21. Щербак А.В.,  
Солопенко Л.И. Исследование условий формирования опасных заторов льда на советском участке Дуная с целью их предсказания. VII Конференция придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Варна, 1973.
22. Бузин В.А. Прогноз межених заторных уровней Днестра с учетом гидрометеорологических условий в период вскрытия рек. Труды ГГИ, 1975, вып.227.
23. Гинзбург Б.М. О некоторых вопросах методики долгосрочных ледовых прогнозов. "Метеорология и гидрология", 1967, № 8, с.82-87.

24. Гинзбург Б.М. Вероятностные характеристики сроков замерзания и вскрытия рек и водохранилищ Советского Союза. Труды Гидрометцентра СССР, вып.118, с.112.
25. Макаревич Т.Н., Ефимова З.А. Характерные черты осенне-зимнего ледового режима р.Дунай. Труды ГГИ, 1962, вып.80, с.126-170.
26. Анискина Н.А., Ляпунова И.Б. О прогнозе суровости зимы в Центральной Европе. Труды ГГИ, 1972, вып.197, с.25-51.
27. Стефанов С. Некоторые особенности атмосферной циркуляции над Европой при ледовых явлениях на р.Дунай. Доклады V конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Белград, 1970, с.144-149.
28. Mită P. Pasibilitati de prognozare a duratei podului de gheata pe Dunărea inferioară. Studii de hidrologie, Bucuresti, 1969, XXVI, s.26-39.
29. Солопенко Л.И. Циркуляционные условия ледообразования на советском участке Дуная. Труды УкрНИГМИ, 1970, вып. 97, с.63-69.
30. Коверный И.А. Вопросы долгосрочных прогнозов ледовых явлений на реке Дунай. IV конференция придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Братислава, 1967.
31. Багров Н.А. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. Труды ЦИП, 1959, вып.74, с.3-24.
32. Савченкова Е.И., Каракаш Е.С. Применение метода разложения метеорологических полей по естественным составляющим для прогноза появления льда на реках Лене и Амуре. Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып.112, с.3-16.
33. Савченкова Е.И., Ефремова Н.Д., Каракаш Е.С. Метод долгосрочного прогноза сроков появления льда на реках Северной Двине, Печоре, Оби, Иртыше, Енисее и Ангаре. Труды Гидрометцентра СССР, 1975, вып.140.
34. Макаревич Т.Н., Ефимова З.А., Савина Л.К. Долгосрочный прогноз продолжительности ледовых явлений на р.Дунае. Труды ГГИ, 1972, вып.197, с.3-24.
35. аноним Доклад о ледовом режиме р.Дунай. Дунайская комиссия, Будапешт, 1967, с.69.

EIN MATHEMATISCHES MODELL FOR PROGNOSEN DER VEREISUNG VON FLOSSEN DURCH COMPUTER-SIMULATION

U. Täubert

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАМЕРЗАНИЯ РЕК ПРИ ПОМОЩИ МОДЕЛИРОВАНИЯ  
НА ЭВМ

У. Тойберт

Zusammenfassung:

Zur Einleitung werden die theoretischen Grundlagen des Wärmehaushaltes von Flüssen unter besonderer Berücksichtigung der Vereisung dargestellt. Gegenstand von Wärmehaushaltsbetrachtungen ist die thermische oder auch innere Energie, die jeder Fluß neben den mechanischen Energieformen mit sich führt. Ausgehend vom ersten Hauptsatz der Thermodynamik, dem Energieerhaltungssatz, wird für ein aus dem Fluß herausgelöstes Bilanzgebiet die Wärmehaushaltsgleichung aufgestellt. Die Wärmequellen und Wärmesenken, die den Energiebeitrag im Bilanzgebiet durch äußere Einflüsse und innere Energieumwandlung verändern, werden im einzelnen behandelt. Eine Form der inneren Energieumwandlung ist das Gefrieren oder Schmelzen, d.h. die Änderung des Aggregatzustandes von Wasser, mit den dazu benötigten oder dabei freiwerdenden Energiemengen.

Das integrierte Modellsystem für Prognosen der Vereisung von Flüssen durch Computer-Simulation besteht aus einem Modell der Datenaufbereitung und dem Modell der Wärmehaushaltes.

Im Modell der Datenaufbereitung sind die Verfahren zusammengefaßt, die als notwendige Hilfsmittel zur Umrechnung der für Simulationen im allgemeinen unzureichenden Meßwerte in Eingabedaten herangezogen werden müssen. Weiterhin enthält dieses Modell Methoden der Extremwertanalyse, die die statistische Auswertung der Daten zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit von extremen Witterungs- und Abflußsituationen gestattet.

Das Modell des Wärmehaushaltes besteht aus einer umfangreichen Folge von Haupt- und Unterprogrammen, mit deren Hilfe die Veränderung der Wärmebilanz einzelner Flußabschnitte unter Einschluß der Vorgänge bei der Vereisung simuliert werden. Das Zusammenwirken des gesamten Modellsystems wird anhand einer Demonstrationsgrafik verdeutlicht. Als Ergebnis von Simulationen ergeben sich die Flußtemperaturen und gegebenenfalls die Eismengen in einzelnen Flußabschnitten sowie ein "Vereisungsgrad" als Verhältnis des Eisvolumens zum Gesamtvolumen des Flußabschnittes.

Schließlich wird das Modellsystem in Form einer Fallstudie auf eine praktische Problemlösung angewendet. Dabei werden die Auswirkungen auf die Vereisung eines Flusses im Einzugsgebiet der Donau analysiert, dem im Winter wärmende Grundwasserzuflüsse entzogen werden sollen. Besondere Berücksichtigung finden hier auch die Einflüsse des Menschen auf den hydrologischen Prozess und auf die Eisverhältnisse des Flusses. Im Rahmen der Fallstudie werden auf der Basis von in diesem Umfang selten durchgeführten Messungen einige neue Erkenntnisse über die wichtigsten Parameter des Wärmehaushaltes gefunden. Bei der Simulation selbst wird zunächst die Eichung des Modells beschrieben, und abschließend werden die Möglichkeiten zur Durchführung von Sensitivitätsanalysen und Prognoserechnungen diskutiert.

Резюме:

При особом учете замерзания в введении описываются теоретические основы теплового баланса рек. Темой рассмотрения теплового баланса является термическая или также внутренняя энергия, которая имеется в каждой реке наряду с механическими видами энергии. Исходя из первого закона термодинамики (закона сохранения энергии), составляется уравнение теплового баланса для выделенной балансовой области реки. Отдельно рассматриваются источники поглотители тепла, которые посредством внешних влияний и внутренних превращений энергии изменяют величину энергии в балансовой области. Замерзание или таяние являются видами внутреннего превращения энергии, т. е. изменение агрегатного состояния воды с необходимой для этого или с выделяющейся при этом массой энергии.

Унифицированная система модели для прогноза замерзания рек с помощью моделирования на ЭВМ состоит из модели подготовки данных и модели теплового баланса.

В модели подготовки данных содержатся методы, использование которых является необходимым вспомогательным средством для переработки данных измерений, которые в обмен недостоверны для моделирования, в вводные данные. Эта модель включает далее методы анализа экстремальных значений, позволяющие проведение систематической обработки данных для определения вероятности крайних метеорологических условий и условий стока.

Модель теплового баланса состоит из обширной последовательности подпрограмм и главных программ, с помощью которых моделируются изменения теплового баланса отдельных участков реки при включении явлений, происходящих при замерзании. Взаимодействие общей системы модели поясняется посредством опытного графика. В результате моделирования на отдельных отрезках реки получают температуры реки и при необходимости объем льда, а также "степень обледенения" в виде отношения объема льда к общему участку реки.

В конце концов система модели применяется в виде отдельного исследования для практического решения проблемы. При этом анализируется влияние на замерзание реки в бассейне Дуная, которая зимой должна быть лишена поступления подогревающих грунтовых вод. Особое внимание здесь уделяется также влиянию, которое оказывает человек на гидрологический процесс и на ледовые условия реки. В рамках отдельного исследования на основании измерений, которые редко проводились в таком масштабе, делаются научные выводы о важных параметрах теплового баланса. В самом моделировании сначала описывается тарирование модели и в заключение рассматриваются возможности проведения анализов сильной восприимчивости модели и прогностических вычислений.

### 1. Einleitung:

Eis bildet sich in Flüssen zunächst an der Sohle und den Böschungen in Form von Grundeis und an der Wasseroberfläche als Treibeis, das zum sogenannten Eisstand zusammenwachsen kann. Bereits das Grundeis kann ein erhebliches Ausmaß annehmen und durch Einengung des Abflußquerschnittes den Wasserspiegel so stark anheben, daß Ausuferungen eintreten. Bei Eisstand kommt noch eine Einengung der Oberfläche dazu, d.h. eine Vergrößerung des benetzten Umfangs auf das Doppelte mit gleichzeitiger Verschlechterung des Rauigkeitsbeiwertes. Das Abflußvermögen wird dadurch sehr stark herabgesetzt, so daß der Wasserstand bei unverändertem Abfluß plötzlich ansteigt. Abb. 1 zeigt diesen Vorgang am Beispiel der Donau im Winter 1955/56.

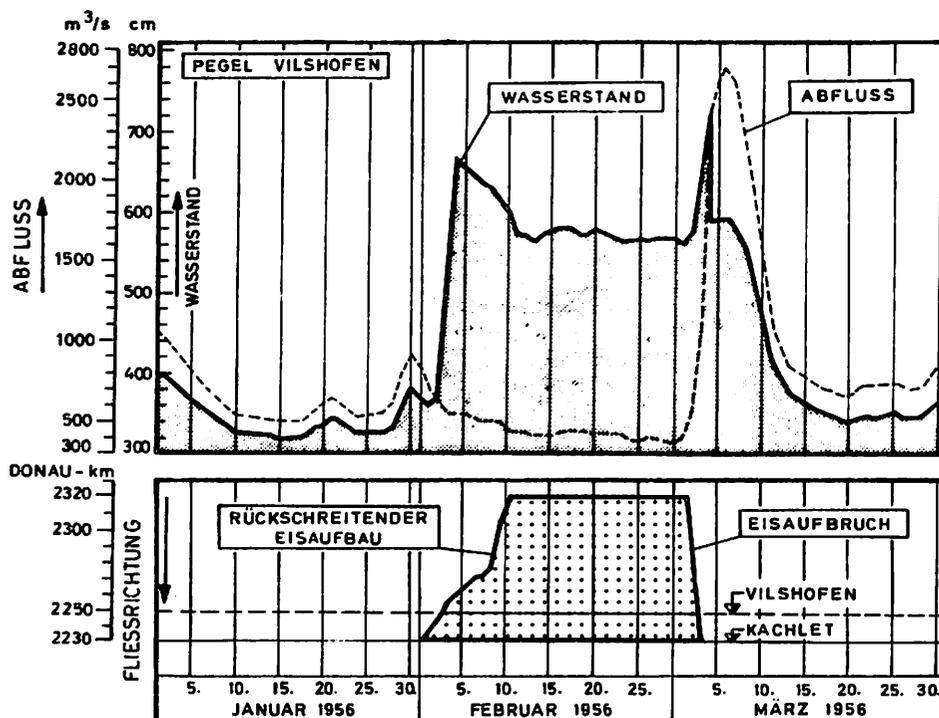


Abb. 1: Wasserstand, Abfluß und Eisstand auf der Donau oberhalb Passau im Winter 1955/56 (nach 2)

Beim Zusammentreffen ungünstiger Umstände kann ein Eisauflbruch das Hochwasser noch verschärfen. Bei Tauwetter, das mit Regenfällen und Schneeschmelze verbunden ist, staut sich der steigende Abfluß zunächst hinter der Eisbarriere. Nach dem Aufbruch bewegt sich dann eine Hochwasserwelle mit einer wegen des größeren Energieliniengefälles gegenüber normalen Hochwässern mehrfach überhöhten Geschwindigkeit stromab, wobei die treibenden Eisschollen die Gefahr noch verstärken. Künstliche Erhöhungen der winterlichen Flußwassertemperaturen, wie sie heute durch die Kraftwerkskühlung häufig auftreten, werden also die Schadenserwartung

in Flüssen und Strömen infolge Eishochwasser herabsetzen. Mit in den letzten Jahren zunehmender künstlicher Aufwärmung blieben z.B. die Bundeswasserstraßen in steigendem Maße eisfrei (3). Bei künstlichen Abkühlungen kleinerer Gewässer infolge Grundwasserentzug muß eventuell mit häufigerem Gefrieren gerechnet werden.

## 2. Die Wärmeleistungsbilanz eines Flußabschnittes

Einem als Bilanzgebiet dargestellten Flußabschnitt (Abb. 2) werden pro Kilogramm des eintretenden Wassers folgende Energiebeträge zugeführt:

- die innere Energie  $u_1$
- die Einschubarbeit  $(p/\rho)_1$   
(Druck mal spezifischem Volumen)
- die kinetische Energie  $v_1^2/2$
- die potentielle Energie  $gz_1$

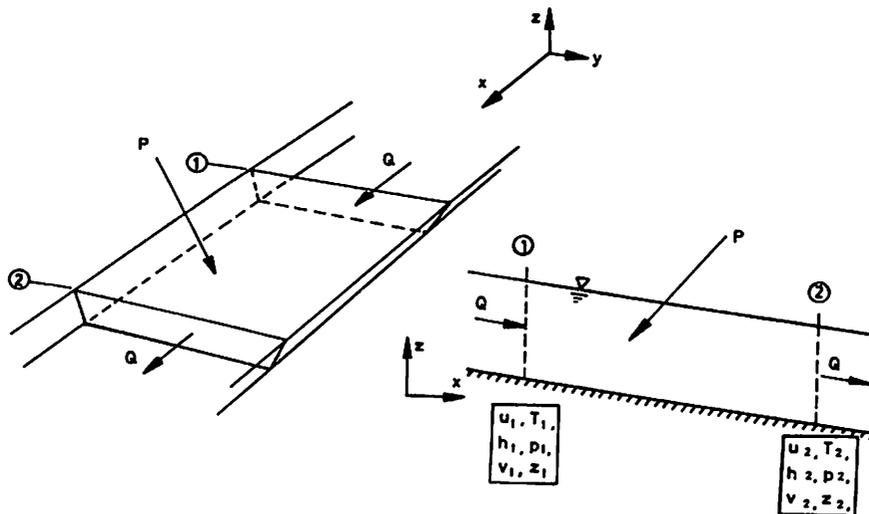


Abb. 2: Schematisierter Abschnitt eines Fließgewässers

Die einzelnen Werte seien über den Querschnitt gemittelt. Faßt man die beiden ersten Summanden zur Enthalpie  $h_1 = u_1 + (p/\rho)_1$  zusammen und multipliziert die Summe aller Teilenergien mit dem Massenstrom  $Q \cdot \rho$ , so erhält man die durch den Eintrittsquerschnitt insgesamt zuströmende Leistung. Unter der Voraussetzung eines kontinuierlichen Abflusses ( $Q_1 = Q_2$ ) ergeben sich ganz analog die Leistungsbeträge, die mit  $Q \cdot \rho$  beim Querschnitt 2 austreten. Dazu kommen auf der positiven Seite der Bilanzen eventuell zugeführte Wärmeströme  $\Phi$  und mechanische Leistungen  $\dot{A}$  (zum Beispiel, allerdings mit negativem Vorzeichen, die Leistung einer Turbine). Dann lautet die Bilanzgleichung

$$Q \cdot \rho \cdot (h_1 + v_1^2/2 + gz_1) + \Phi + \dot{A} = Q \cdot \rho \cdot (h_2 + v_2^2/2 + gz_2) \quad [1]$$

Bezeichnet man die Differenz zwischen 1 und 2 mit  $\Delta$ , also z.B.  $\Delta z = z_2 - z_1$ , dann ergibt sich

$$Q \cdot \rho \cdot \Delta h + Q \rho \frac{\Delta v^2}{2} + Q \cdot \rho \cdot g \cdot \Delta z = \Phi + \dot{A} \quad [2]$$

Diese Gleichung entspricht für  $\Phi + \dot{A} = 0$  und bei vernachlässigbarer Temperaturänderung (d.h.  $\Delta u = 0$  und damit  $\Delta h = \Delta p / \rho$ ) der Bernoulli-Gleichung.

Führt man anstelle von  $Q \cdot \rho \cdot \Delta h$  den Enthalpiestrom  $\Delta \dot{H}$  ein, nimmt man ferner gleichförmigen Abfluß an, so daß das Geschwindigkeitsglied verschwindet, und faßt man die Änderung der potentiellen Energie mit  $\Phi + \dot{A}$  zusammen:

$$\Phi + \dot{A} - Q \rho g \Delta z = P,$$

dann erhält man

$$\Delta \dot{H} = P. \quad [3]$$

Mit der für isobare Vorgänge gültigen Beziehung

$$\Delta \dot{H} = V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad [4]$$

ergibt sich daraus

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{1}{\rho c_p} \cdot \frac{P}{V} \quad [5]$$

Bezeichnet man  $P/V$  als die von  $x$  und  $t$  abhängige raumspezifische Leistungsänderung  $P_s(x, t)$  z.B. in  $\text{Watt/m}^3$ , so erhält man mit  $\Delta T = T(x, t) - T(x=0, t=0)$  und  $\Delta t = x / v(x, t)$  die Funktion für den Temperaturlängsschnitt eines fließenden Gewässers:

$$T(x, t) = T(x=0, t=0) + \frac{1}{\rho c} \cdot \frac{P_s(x, t)}{v(x, t)} \cdot x \quad [6]$$

Als Wärmehaushaltsgleichung kann Gleichung [5] mit  $V / \Delta t = Q$  in der Form

$$Q \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T = P \text{ in Watt oder cal/s} \quad [7]$$

geschrieben werden. Damit ist ausgedrückt, daß die Änderung  $Q \rho c \Delta T$  des Wärmehaushaltes eines fließenden Gewässers gleich der Bilanz  $P$  seiner Wärmequellen und Wärmesenken ist.

Bei der Betrachtung eines Flußabschnittes als zeitlich und örtlich begrenztes Subsystem der Erdoberfläche setzt sich die Bilanz  $P$  grundsätzlich aus folgenden Bilanzgliedern zusammen:

1. Wärmezufuhr oder Wärmeabgabe im Austausch über die Grenze des Bilanzgebietes durch
  - Strahlung,
  - Verdunstung oder Kondensation,
  - Konvektion,
  - Wärmeübergang vom und zum Gewässerbett,
  - mechanische Arbeit (Pumpen, Schiffsmotoren, Wasserkraftwerke),
  - punktuelle Zu- und Abflüsse (Nebenflüsse, Ableitungen, Einleitungen),
  - verteilte Zu- und Abflüsse (Grundwasserzufuhr, Versickerung, direkte Niederschläge, Oberflächenzufluß).
2. Wärmegewinn oder Wärmeverlust infolge Energieumwandlung innerhalb des Bilanzgebietes durch
  - chemische Reaktionen und biologische Abbauprozesse,
  - Änderung des Aggregatzustandes (Gefrieren oder Schmelzen von Eis),
  - innere Reibung.

All diese Wärmequellen und Wärmesenken sind in (4) ausführlich beschrieben. Als hier besonders interessie-

rend sei nur aus den Arten der inneren Energieumwandlung die Änderung des Aggregatzustandes herausgegriffen. Die praktische Bedeutung der inneren Energieumwandlung ist relativ gering; sie muß nur in Sonderfällen, wie zum Beispiel bei der Vorhersage von Vereisungen (5), berücksichtigt werden.

Bei der Eisbildung wird die latente Wärme  $L$  von  $80 \text{ cal/g} = 332 \text{ J/g}$  an die Umgebung abgegeben, beim Schmelzen wird dieser Betrag verbraucht. Zur Verdeutlichung des zeitlichen Ablaufs der dadurch hervorgerufenen Änderungen des Wärmehaushalts möge Abb. 3 dienen: Bei negativer Wärmebilanz sinkt die Wassertemperatur infolge eines konstanten Wärmeverlustes zunächst linear bis auf einige Hundertstel Grad unter  $0^\circ\text{C}$ , bevor sich erste Eiskristalle bilden (Punkt 2). Die Geschwindigkeit der Temperaturabnahme verringert sich dann, da durch die Freigabe der latenten Wärme der Wärmeverlust verkleinert wird, und zwar so lange, bis zwischen dem Verlust und dem Gewinn an latenter Wärme Gleichgewicht besteht und das Temperaturminimum erreicht ist (Punkt 3). Danach steigt die Temperatur infolge der jetzt kurzzeitig positiven Bilanz wieder an, bis erneut ein Ausgleich erreicht ist, und bleibt dann konstant (Punkt 4). Von hier ab wird stets so viel Eis gebildet, daß der Wärmeverlust an die Umgebung durch den Gewinn an latenter Wärme gerade aufgehoben wird.

Der Vorgang wird beschrieben durch die Gleichung

$$L \cdot \frac{dm_E}{dt} = c \cdot m_W \cdot \frac{dT}{dt} - \Phi \quad [8]$$

Darin steht  $m_E$  für die Eismasse,  $m_W$  für die Wassermasse und  $t$  für die Zeit. Bei ausgeglichener Bilanz ist  $dT/dt = 0$ ; die pro Zeiteinheit gebildete Eismasse ergibt sich aus

$$\frac{\Delta m_E}{\Delta t} = - \frac{\Phi}{L} \quad [9]$$

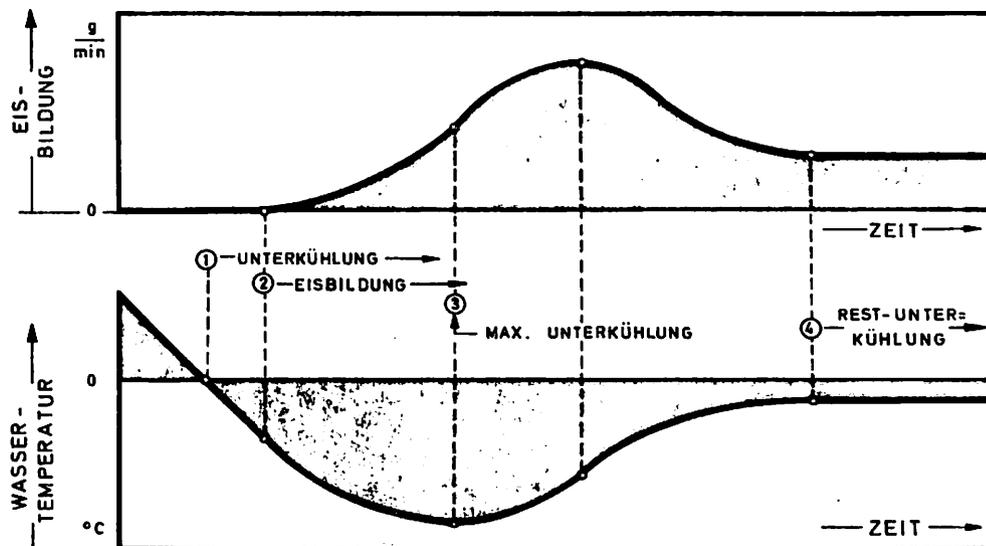


Abb. 3: Schema des Vorgangs bei Beginn der Eisbildung (nach 5)

### 3. Das Mathematische Modell-System

#### 3.1 Die Parameter der Wärmequellen und Wärmesenken

Aus der Systemskizze in Abb. 4 geht die Hierarchie der für Simulationen erforderlichen Parameter und Wärmehaushaltsfaktoren hervor. Das Schema ist für einen beliebigen, durch die Kontrollquerschnitte I und I + 1 abgeteilten Bilanzraum aufgestellt, in dessen Bereich mit Mittelwerten gerechnet werden kann. Es wird deutlich, daß zwei verschiedene Typen von Daten erforderlich sind: Zunächst für die ganz links stehenden hydrologischen und meteorologischen Eingangsparameter, für die sie in Abhängigkeit von der Zeit,

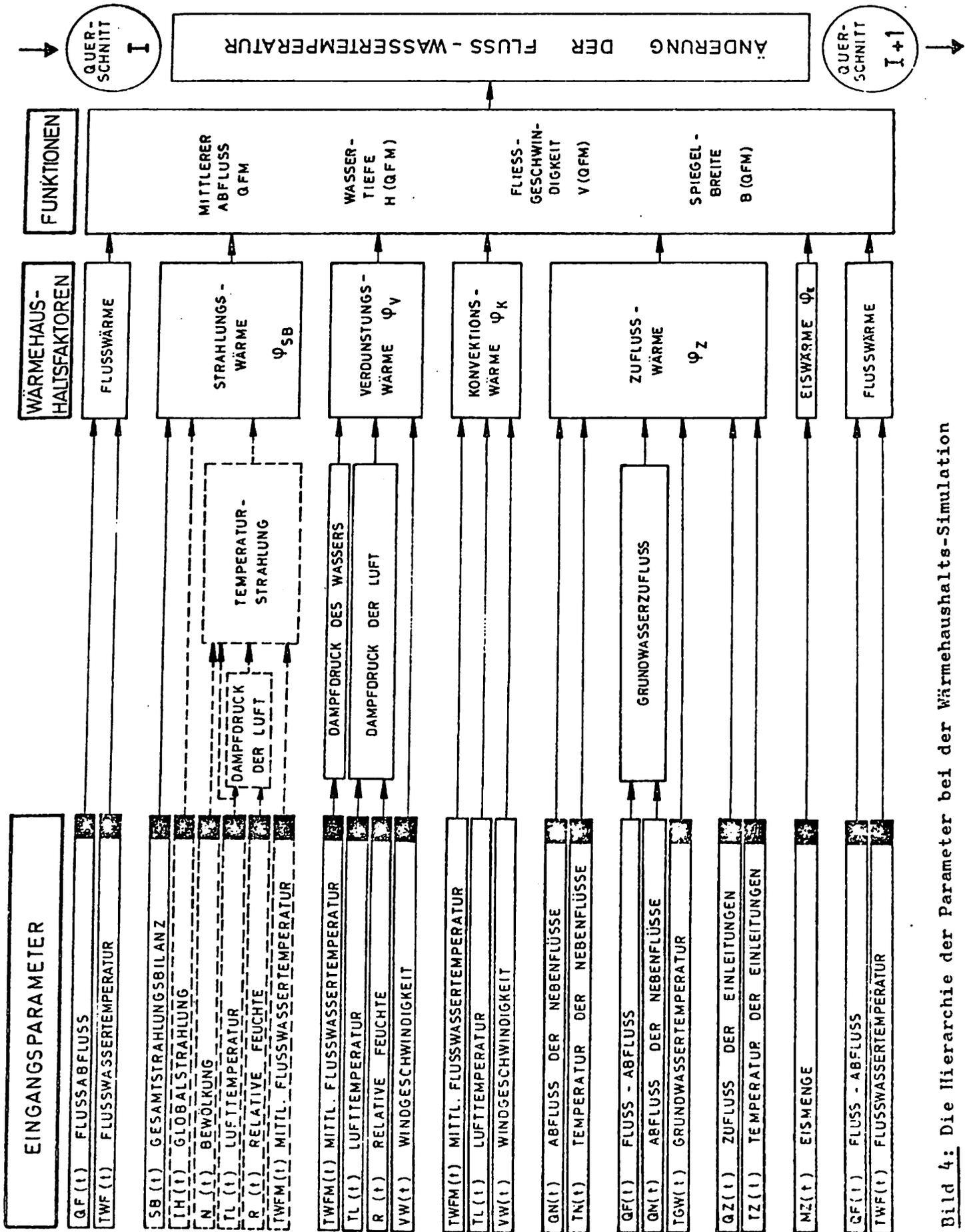


Bild 4: Die Hierarchie der Parameter bei der Wärmehaushalts-Simulation

also in Form von Ganglinien vorliegen müssen, und dann für die zur Umrechnung der Wärmebilanz in Temperaturänderungen erforderlichen hydraulischen Parameter, für die sie in Abhängigkeit vom Abfluß, also in Form von Abflußkurven, bekannt sein müssen.

Das eigentliche Modell-System setzt sich aus zwei gleich wichtigen Einzel-Modellen zusammen, dem

Modell des Wärmehaushalts,

und, diesem in der Anwendung vorgeschaltet, dem

Modell der Datenaufbereitung.

### 3.2 Modell der Datenaufbereitung

Entsprechend der Reihenfolge der Anwendung soll zunächst das Modell der Datenaufbereitung erläutert werden. Dieses Modell dient ganz allgemein der Umwandlung von Meßwerten, die sicher immer in einer gewissen Vielfalt vorliegen, jedoch im allgemeinen nicht für eine direkte Verwendung geeignet sind, in Eingangsdaten für das Modell des Wärmehaushalts. Es besteht aus 4 verschiedenen Elementen, mit deren Hilfe die Daten so aufbereitet werden, daß eine zeit- und ortskontinuierliche Wärmehaushalts-Simulation möglich wird.

Im einzelnen sind dies programmierte Verfahren

- zur Ergänzung unvollständiger Meßreihen,
- zur Berücksichtigung des Tagesgangs solcher Parameter, deren Tagesgang nicht vernachlässigt werden sollte,
- zur Auswahl von Simulationsperioden durch Extremwertanalysen und
- zur Bestimmung hydraulischer Kennwertfunktionen.

Zur Ergänzung von lückenhaften und zu kurzen Meßreihen wurde das Verfahren der Regressionsrechnung herangezogen. Einige der untersuchten Abhängigkeiten sind in Abb. 5 schematisch dargestellt.

Zur Berücksichtigung des Tagesgangs der Eingangsparameter Strahlungsbilanz, Wassertemperatur, Lufttemperatur und Feuchte war die Entwicklung eines neuen Verfahrens erforderlich, da Messungen in der Regel nur einmal am Tag durchgeführt werden, Eingangsdaten für die Simulation jedoch zu verschiedenen Tageszeiten - in regelmäßigen Abständen - benötigt werden. Ausgehend von der Erfahrung, daß die Formen der einzelnen Tagesganglinien eines Parameters im allgemeinen einander recht ähnlich sind, werden mit Hilfe dieses Modellelementes sogenannte Norm-Tagesganglinien ermittelt. Diese werden durch Fourier-Koeffizienten dokumentiert und während der Simulation dann jeweils in ihrer Höhenlage so verschoben, daß sie durch den für eine einzige Uhrzeit bekannten Datenwert verlaufen. Die so festgehaltene Normganglinie bestimmt dann den ganzen Tagesgang des entsprechenden Parameters während des gerade simulierten Tages. Speziell bei der Strahlungsbilanz mußte außerdem noch die Möglichkeit einer gezielten Verzerrung der Ganglinie vorgesehen werden.

Eine Auswahl von kürzeren Simulationsperioden ist erforderlich, da eine Simulation des Wärmehaushalts über längere Zeiträume hinweg wegen des enormen Computerzeit-Aufwandes nicht möglich ist. Da es jedoch wichtig ist, das Verhalten des Systems besonders während extremer Abfluß- und Witterungszustände zu erforschen, wurden als weiteres Element einige Verfahren der Extremwertanalyse in das Modell der Datenverarbeitung integriert. Nach einem praktischen Einsatz dieses Modell-Elements ist es dann möglich, quantitativ, d.h. durch Angabe eines Wahrscheinlichkeitsgrades oder eines mittleren Wiederkehrintervalls, festzuhalten, wie extrem eine bestimmte Abfluß- oder Witterungsperiode ist (Abb. 6). Man kann also zum Beispiel die Aussage treffen,

- daß eine Trockenperiode mit Abflüssen kleiner oder gleich  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  und einer Dauer von 15 Tagen mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % auftritt oder dementsprechend alle 10 Jahre wiederkehrt,
- oder daß eine Kälteperiode mit Lufttemperaturen unter  $-10^\circ\text{C}$  und einer Dauer von 10 Tagen mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 %, d.h. alle 20 Jahre auftritt.

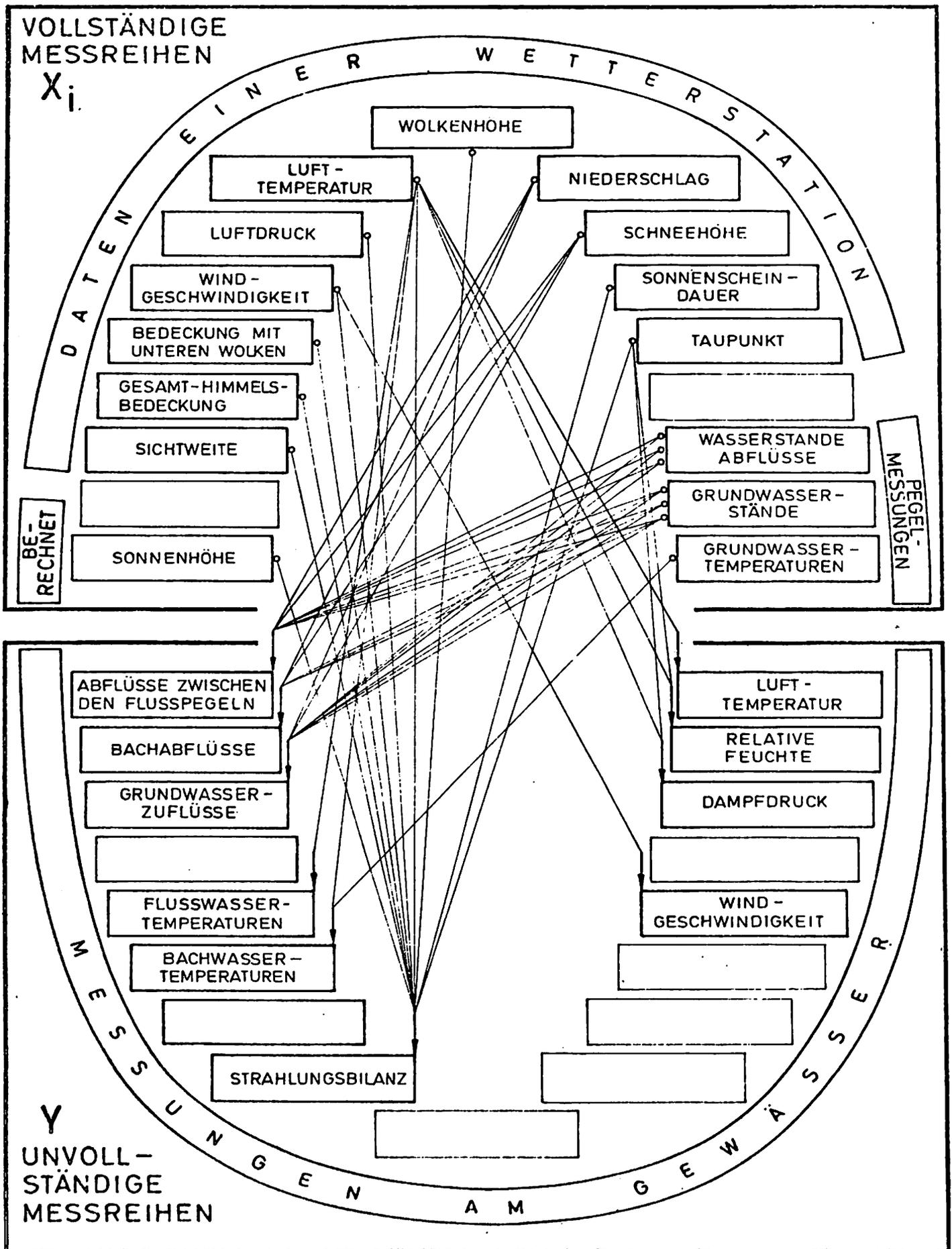


Bild 5: Hypothesen für die Aufstellung von Regressionsgleichungen

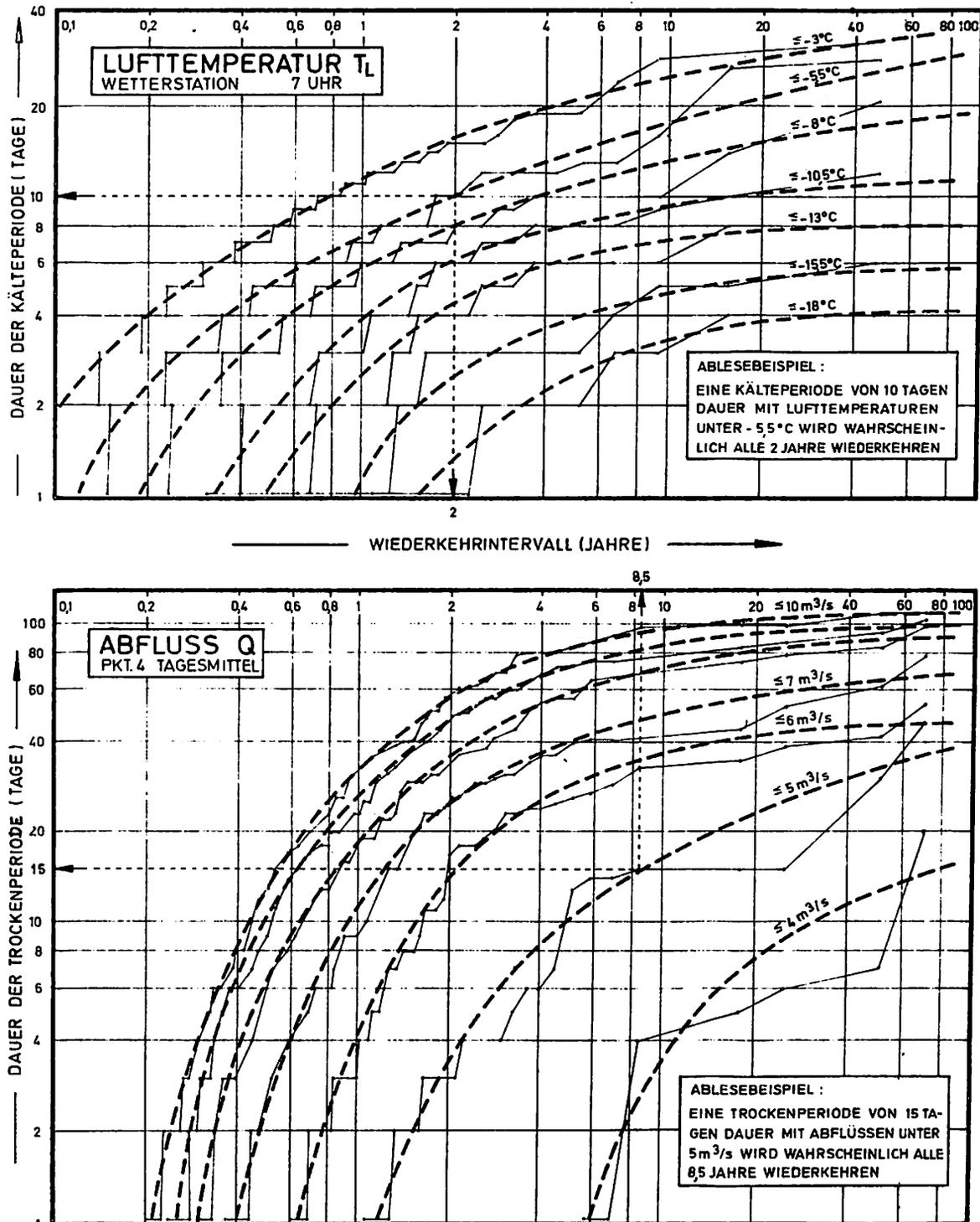
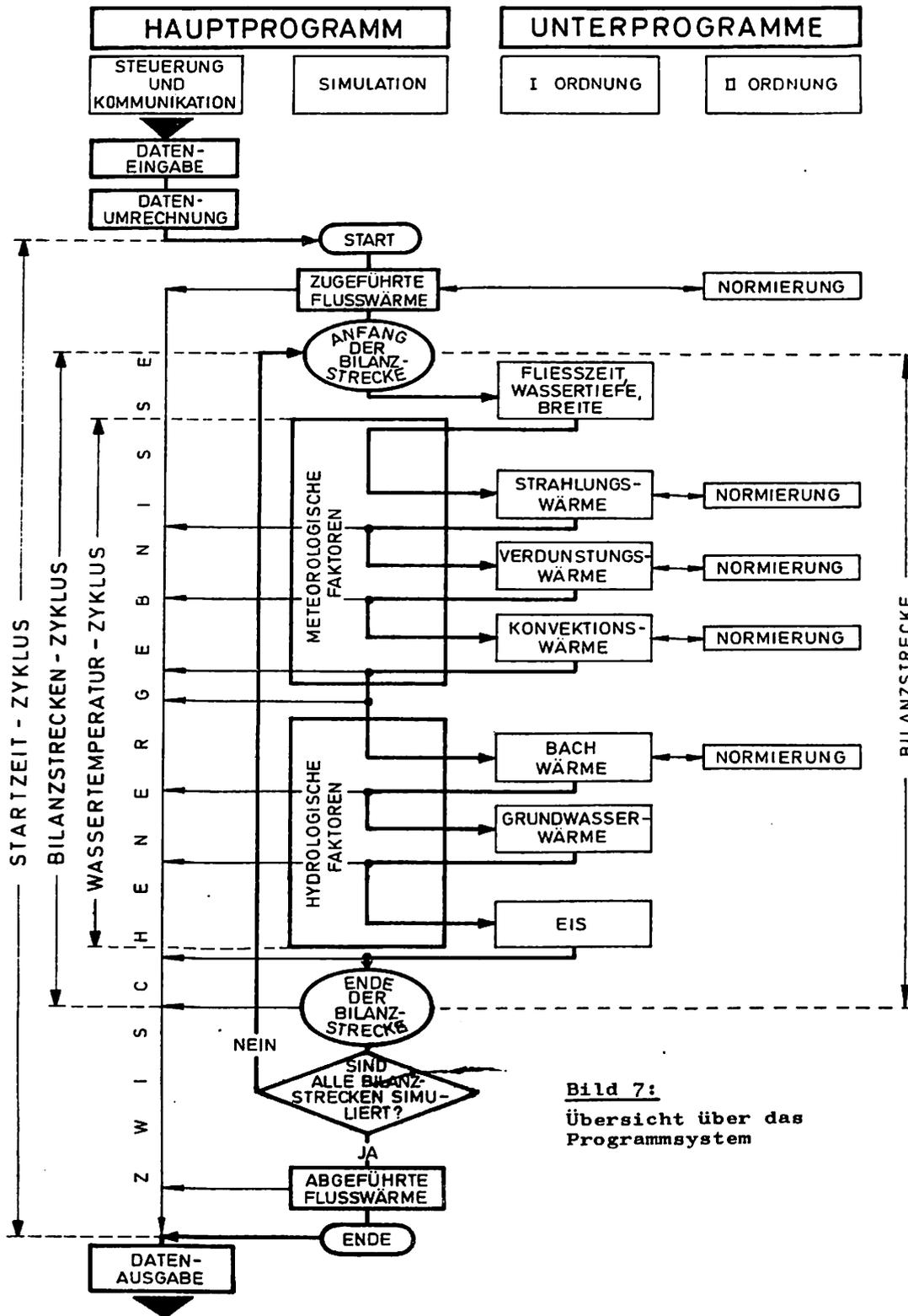


Abb. 6: Extremwertanalysen für Kälteperioden (Jahresreihe 1949/72) und Trockenperioden (1930/68)

Das vierte Element des Modells der Datenaufbereitung dient der Bestimmung hydraulischer Kennwertfunktionen aufgrund von vorliegenden Messungen, das heißt Funktionen der Parameter Wassertiefe, Fließgeschwindigkeit und Spiegelbreite in Abhängigkeit von Abfluß.

### 3.3 Modell des Wärmehaushalts

Dieses Modell besteht aus einem Programmsystem von einem Hauptprogramm und mehreren Unterprogrammen (Abb. 7).



**Bild 7:**  
Übersicht über das  
Programmsystem

Im Hauptprogramm dient ein Teil der Steuerung des Programmablaufs und der Kommunikation zwischen Anwender und Computer, also der Datenein- und Datenausgabe, der andere der eigentlichen Simulation.

Während der Simulation liefern die einzelnen U n t e r p r o g r a m m e

- erstens: die entsprechend dem jeweiligen Abfluß gültigen hydraulischen Kennwerte und
- zweitens: die verschiedenen Wärmehaushalts-Faktoren, die die Flußtemperatur beeinflussen.

Dabei bedienen sie sich teilweise eines weiteren Unterprogrammes, des Normierungsprogramms, mit dem entsprechend dem oben geschilderten Norm-Tagesganglinien-Verfahren Daten umgerechnet werden.

Im einzelnen wurden Unterprogramme für alle von ihrer Größenordnung her relevanten Wärmehaushaltsfaktoren aufgestellt, und zwar für

- die Strahlungswärme,
- die Verdunstungswärme,
- die Konvektionswärme,
- die Wärme aus punktuellen Zuflüssen und Einleitungen sowie für
- die Wärme aus verteilten Grundwasserzuflüssen.

Das für den hier behandelten Zweck wichtigste Unterprogramm dient der Berechnung des Eisvolumens und des Vereisungsgrades als Verhältnis des Eisvolumens zum Gesamtvolumen (von Eis + Wasser) in einem Flußabschnitt.

Bei der Anwendung dieses Programmsystems zur Simulation wird die jeweilige Projektstrecke zunächst in einzelne Bilanzstrecken unterteilt. Die Grenzen dieser Bilanzstrecken liegen an Einmündungen oder auch an Meßstationen. Ausgehend vom Beginn der Projektstrecke wird dann - in Fließrichtung - das Programmsystem auf jede Bilanzstrecke angewendet, und zwar immer so, daß die für das Ende der vorherigen berechnete Temperatur den Eingangswert für die nachfolgende Bilanzstrecke bildet. Dieser Vorgang wird in frei wählbaren konstanten Zeitabschnitten (1, 3, 4 oder 6 Stunden) beliebig lange wiederholt. Aus den Ergebnissen läßt sich dann neben der Temperatur sowohl die zeitliche Verteilung der Eismengen - als Ganglinie - als auch ihre örtliche Verteilung - als Längsschnitt - entnehmen.

### 3.4 Zusammenwirken des Modellsystems

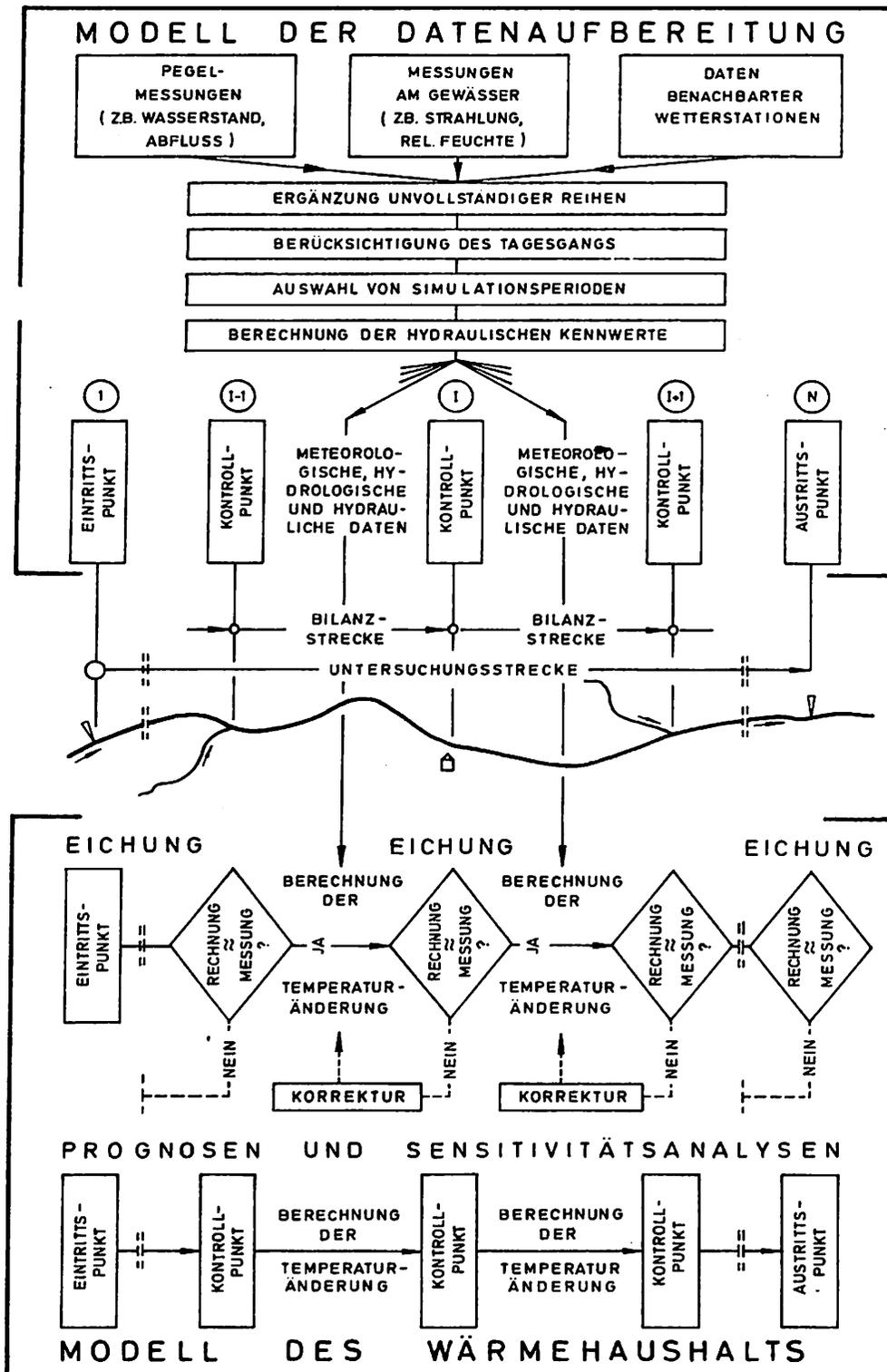
Das logische Konzept des Modellsystems, anhand dessen das Schema des Arbeitsablaufes bei der Anwendung des Modells für eine bestimmte Untersuchungsstrecke verdeutlicht werden kann, ist in Abb. 8 dargestellt. Nach Umwandlung der Meßwerte in Simulationsdaten für die Bilanzstrecken durch die einzelnen Elemente des Datenverarbeitungs-Modells wird das Wärmehaushalts-Modell im Rahmen der Eichung an die konkrete Projektsituation angepaßt. Darauf folgt der eigentliche Einsatz des Modellsystems zur Prognose von Vereisungen und schließlich zu Sensitivitätsanalysen zwecks Untersuchung der Empfindlichkeit des natürlichen Systems gegenüber dem Maß eventueller Veränderungen einzelner Parameter des Wärmehaushalts.

## 4. Anwendung in einer Fallstudie

### 4.1 Projektbeschreibung

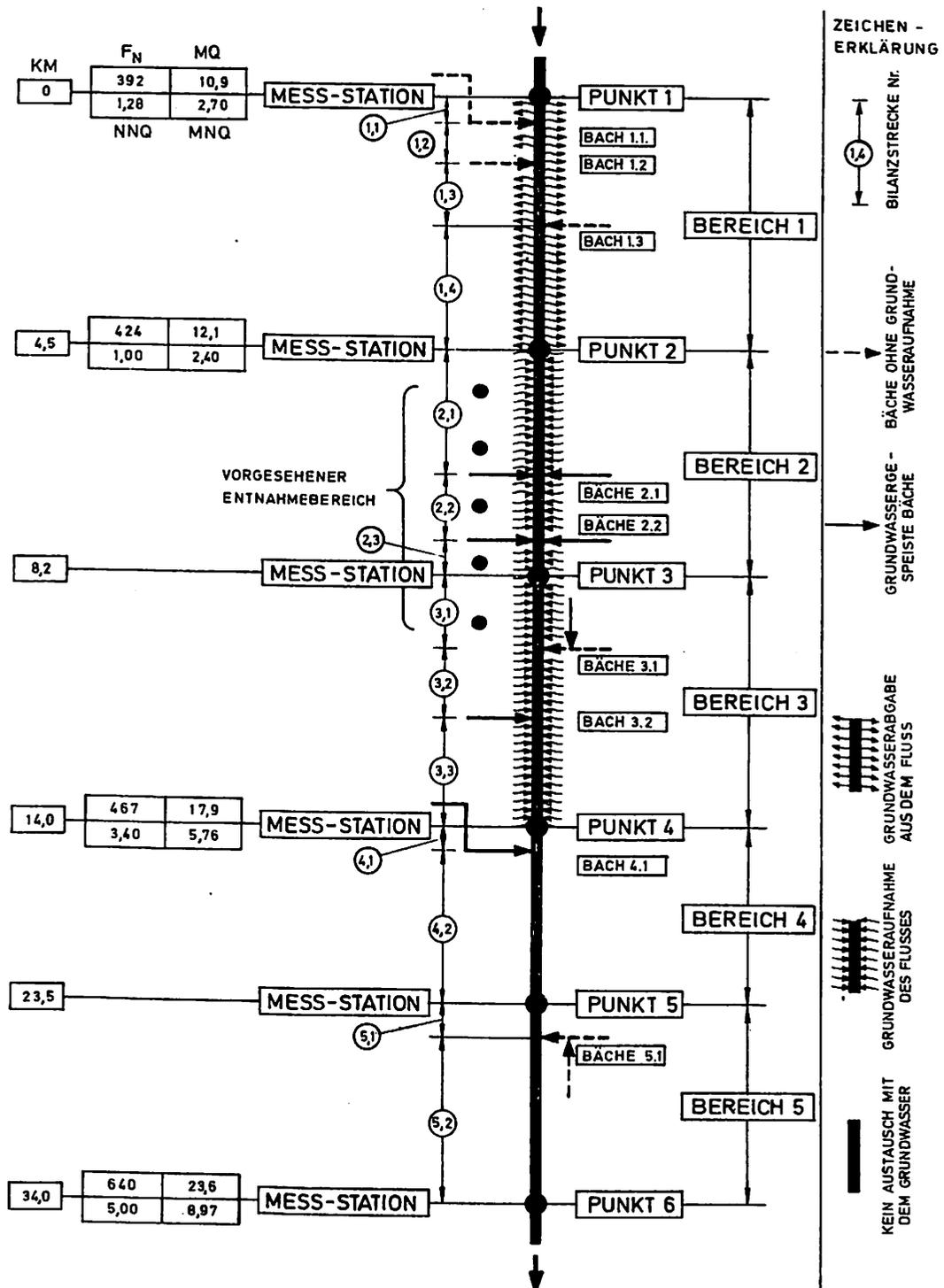
Die Loisach, ein kleinerer Fluß im Einzugsgebiet der Donau (Mittelwasser etwa  $12 \text{ m}^3/\text{s}$ ), erhält auf einer 10 km langen Strecke einen großen Anteil ihres Zuflusses aus einem gleichmäßig (etwa  $8^\circ \text{ C}$ ) temperierten Grundwasserstrom. Dadurch wird neben dem Abfluß, der auf dieser Strecke überproportional zunimmt, auch die Flußtemperatur beeinflusst: Der Fluß wird im Winter vom Grundwasser erwärmt und im Sommer abgekühlt. Infolgedessen wird im Bereich des Grundwasserzutritts auch die Jahresamplitude, also der Schwankungsbereich der Flußtemperatur, merklich kleiner. Einen Überblick über die Situation liefert das Schema des Gewässersystems in Abb. 9.

Es ist geplant, aus diesem Grundwasserstrom Trinkwasser abzuleiten, das dann - nach den Ergebnissen von Voruntersuchungen - zumindest zum Teil dem Fluß verloren gehen wird. Als Folge davon wird befürchtet, daß



**Bild 8:** Zusammenwirken des Modellsystems

im Winter, in dem in der Regel die niedrigsten Abflüsse vorkommen, eine wesentlich häufigere und stärkere Vereisung des Flusses unterhalb des Entnahmebereichs auftreten wird. Ob und in welchem Maß dies wirklich zu erwarten wäre, sollte durch Einsatz des Modellsystems wissenschaftlich untersucht werden.



**Bild 9:** Schema des Gewässersystems

Es standen umfangreiche Meßergebnisse zur Verfügung, die jedoch nicht im Hinblick auf die Simulation erhoben worden waren, so daß zunächst alle Elemente des Modells zur Datenaufbereitung eingesetzt werden mußten.

#### 4.2 Berechnungen

Die Anwendung des Modells des Wärmehaushalts begann mit der Eichung. Als Ergebnis der Eichsimulation mehrerer unterschiedlich langer Perioden ergab sich eine mittlere Abweichung zwischen Soll- und Istwerten der Wassertemperatur von  $0,58^{\circ}\text{C}$ . Dieser Wert kann im Vergleich zu den bei Wärmelastrechnungen erreichten als gut gelten. Eine Eichung bezüglich der Eismengen war mangels exakter Messungen nur qualitativ möglich und auch das nur für den bekannt kalten Winter 1962/63, da der Fluß sonst nicht zufror. Die Übereinstimmung zwischen den Rechnungen und Beobachtungen waren befriedigend.

Nach der Eichung wurde das Modell dazu benutzt, um

- die Empfindlichkeit des Flusses auf Veränderungen der einzelnen Parameter in **Sensitivitätsanalysen** nachzuweisen und um
- die Auswirkungen einer Ableitung von Teilen der Grundwasserzuflüsse auf die Vereisung mit Hilfe von **Prognoserechnungen** vorherzusagen.

Als Ergebnis einer der **Sensitivitätsanalysen** ist in Abb. 10 zu sehen, wie empfindlich der Parameter Eisvolumen auf den Entzug von warmem Grundwasserzufluß reagiert. In verschiedenen Simulationsläufen zur Sensitivitätsanalyse wurden die Grundwasserzuflüsse jeweils so verringert, daß an dem unterhalb der Entnahmebrunnen gelegenen Punkt 4 (Abb. 8) gegenüber dem bisherigen NNQ von  $3,4\text{ m}^3/\text{s}$  nur noch  $3,0$  oder  $2,5$  oder  $2,0\text{ m}^3/\text{s}$  abfließen. Diesen Abflußwerten kann man nach Beginn der Entnahme eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von  $5$  bzw.  $2,5$  bzw.  $0,8\%$  zuordnen. Die Lufttemperatur bei Punkt 4 betrug  $-9,5^{\circ}\text{C}$ , wofür sich eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von  $3\%$  ergibt.

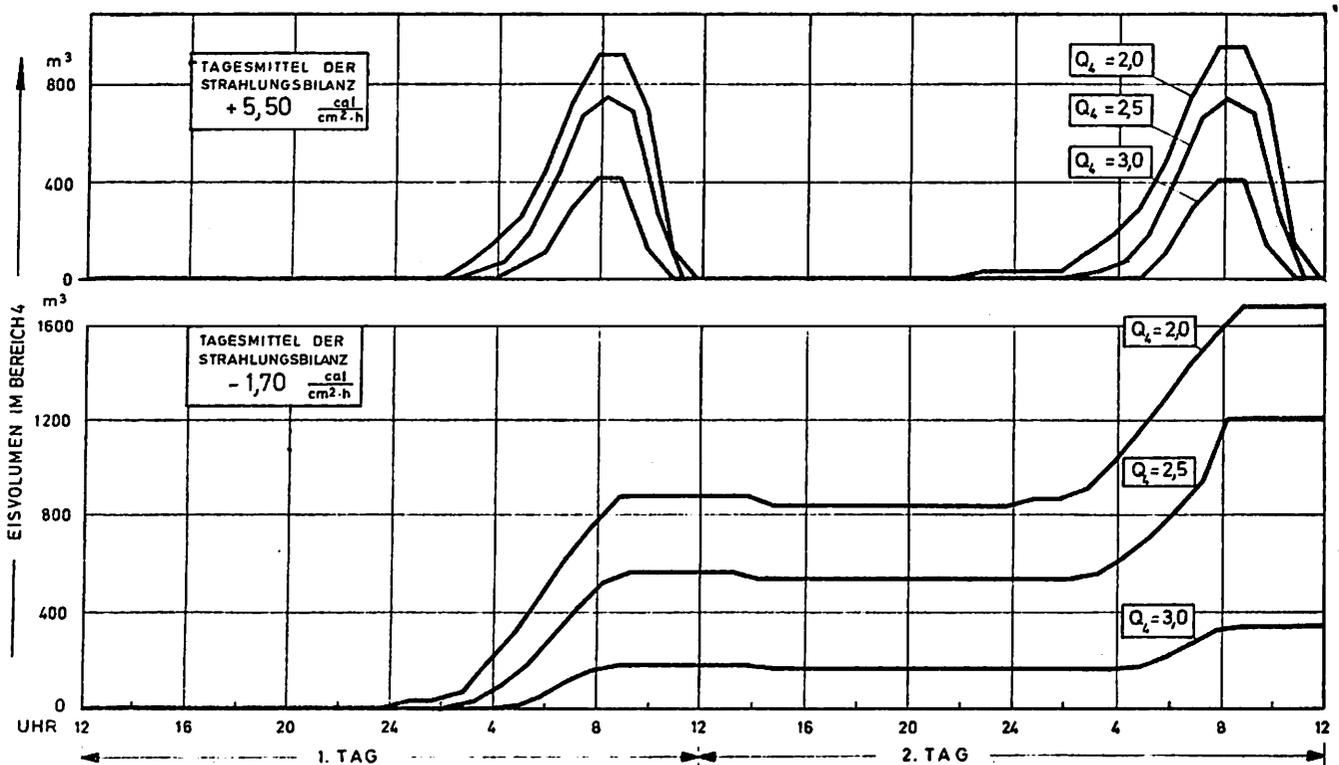
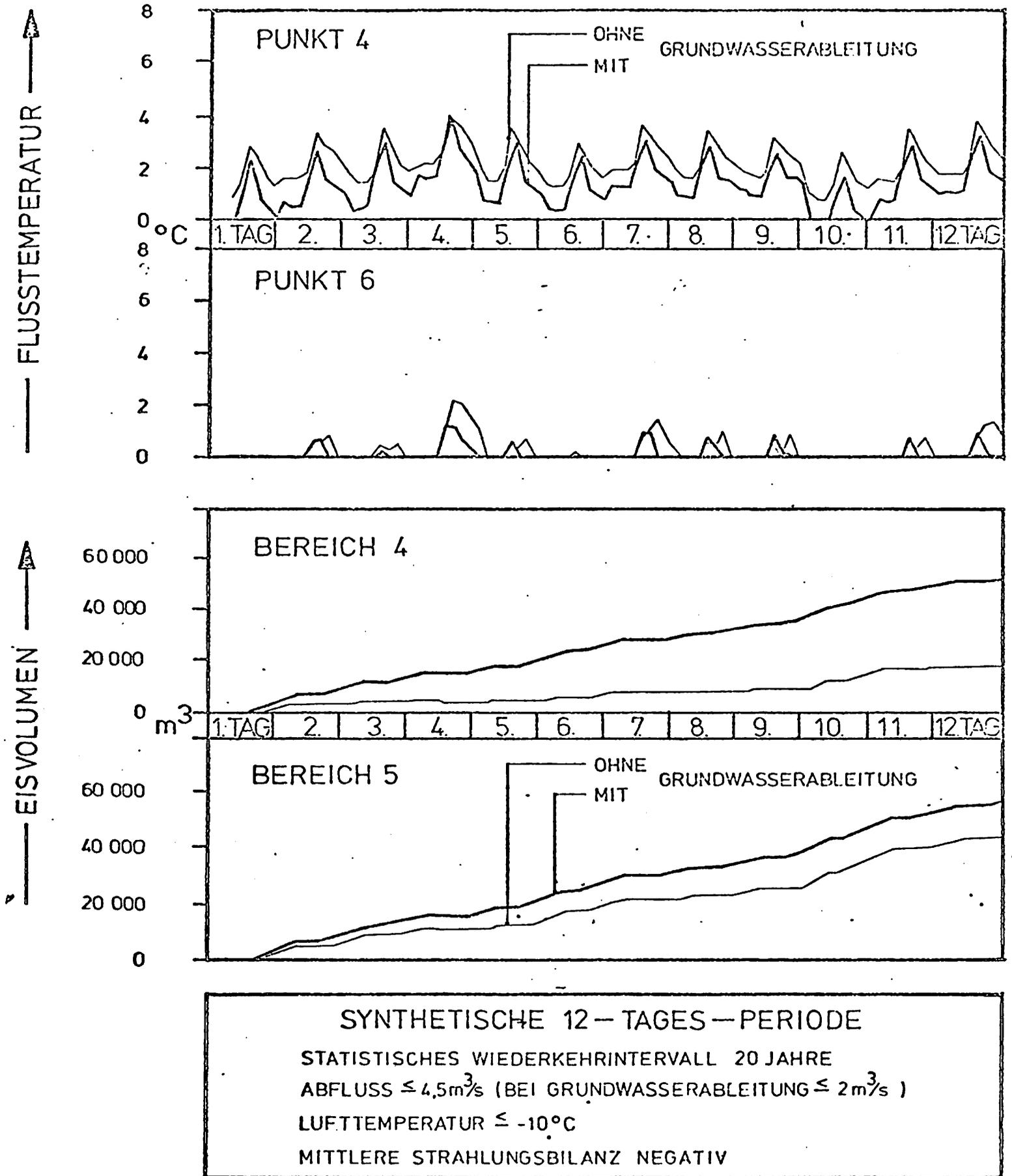


Abb. 10: Ganglinien des Eisvolumens in Abhängigkeit von Strahlungsbilanz und Abfluß



**Bild 11:** Ganglinien der Flußtemperatur und des Eisvolumens während einer 12-Tages-Periode mit 20-jähriger Wiederkehr

Als Ergebnis dieser Untersuchungen kann festgestellt werden, daß das sich im Bereich 4 nachts in geringen Mengen bildende Eis bei positiven Tagesmitteln der Strahlungsbilanz von z.B.  $+ 5,5 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$  am 28.2.1973 tagsüber stets wieder abtaut, während bei anhaltend negativem Tagesmittel, wie z.B.  $-1,7 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$  am 28.1.1972, mit laufender Zunahme von Eis gerechnet werden muß.

Das bei der über zwei Tage laufenden Sensitivitätsanalyse errechnete Eisvolumen ging jedoch in keinem Fall über 4 % des Gesamtvolumens hinaus. Mit welcher Wahrscheinlichkeit längere Kälte- und Trockenperioden mit den gewählten Werten für Lufttemperatur und Abflüsse auftreten, d.h. mit welcher Wahrscheinlichkeit größere Vereisungen als die hier ermittelten zu erwarten sind, läßt sich mit Hilfe der Abb. 6 bestimmen.

Die Prognoserechnungen umfaßten sowohl einige tatsächlich aufgetretene, im Rahmen des Meßprogramms verfolgte Zeiträume von mehreren Monaten Dauer als auch einige kürzere synthetische Perioden, für die die Daten mit ausgewählten Wiederkehrintervallen künstlich zusammengestellt werden.

Die Rechenergebnisse wurden in Form von umfangreichen Listen ausgedruckt, die auch eine Vielzahl von Zwischenergebnissen wie die einzelnen Anteile der Wärmehaushaltsfaktoren und die Veränderungen von Temperatur und Vereisung für jeden Bilanzbereich und jeden Zeitschritt enthielten.

Aufgrund von Plausibilitätsprüfungen dieser Zwischenergebnisse und der Gesamtergebnisse konnte die Richtigkeit der Vereisungsprognosen festgestellt werden.

Als Beispiel für die zeichnerische Darstellung der Ergebnisse von Prognoserechnungen mögen die in Abb. 11 gezeigten Ganglinien für eine synthetische 12-Tages-Periode dienen, deren statistische Wiederkehr nach der Extremwertanalyse alle 20 Jahre zu erwarten ist.

#### L i t e r a t u r h i n w e i s e:

1. Lászlóffy, W. Die Eisverhältnisse der Donau. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 11, Sonderheft, S. 52, 1967.
2. Völk, J. Die Eisverhältnisse der Donau und der übrigen Gewässer Bayerns, insbesondere im Winter 1962/63. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 11, Sonderheft, S. 72, 1967.
3. Wallner, J. Eisbildung und Warmwassereinleitungen in Bundeswasserstraßen. Zeitschrift für Binnenwasserschifffahrt und Wasserstraßen, 99, H. 3, S. 96, 1972.
4. Täubert, U. Wasserwirtschaftliche Systemanalyse des Wärmehaushalts von Flüssen. Darmstädter Wasserbau-Mitteilungen Nr. 12, 1974.
5. Cartens, T. Heat exchanges and frazil formation. I.A.H.R. Symposium Ice and its action on hydraulic structures. Reykjavik, Iceland, 7. - 10. September 1970.

NÄHERUNGSWEISE BESTIMMUNG DES EINTRITTS VON EISERSCH EINUNGEN AUF DER  
GRUNDLAGE DER WAHRSCHEINLICHKEITSRECHNUNG

J. Csoma

ОЦЕНКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Я. Чома

Zusammenfassung:

Die Eisverhältnisse an Flüssen, das Auftreten von Eis und die Enteisung von Gewässern sind im Grunde genommen Wärmebilanz-Vorgänge, die von den meteorologischen, hydrologischen und morphologischen Bedingungen des jeweiligen Gewässers bestimmt werden. Für eine genaue Beschreibung der Wärmeverhältnisse von Wasserläufen benötigt man Daten über eine Reihe von Faktoren, wobei jedoch nur Wasser- und Lufttemperaturwerte zur Verfügung stehen, sowie Daten von Eiserscheinungen. Daher besitzen wir gegenwärtig noch keine Methode zur Vorhersage von Eiserscheinungen aufgrund der Berechnung der jeweiligen Wärmeverhältnisse.

In der vorliegenden Arbeit wird nun ein Verfahren zur näherungsweisen Bestimmung des Eintritts von Eiserscheinungen aufgrund der zur Verfügung stehenden Wasser- und Lufttemperaturwerte vorgeschlagen. Aufgrund von Beobachtungsdaten wurden theoretische Temperatursummen ermittelt, und unter Verwendung dieser Summe als Variable wurden die charakteristischen Funktionen der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Eintritts einzelner Eiserscheinungen berechnet. Die Vorhersage der Eiserscheinungen erfolgte aufgrund fortlaufender Summierung von Wahrscheinlichkeiten.

Резюме:

В статье рассматривается метод оценки возникновения ледовых явлений с учетом имеющихся данных относительно температуры воды и воздуха. На основе эффективных данных определяется теретическая сумма тепла воздуха, потом учитывая эти суммы как случайные величины рассматриваются кривые распределения, характеризующие формирование ледовых явлений. Путем сочетания вероятностей дается метод вычисления для прогнозирования ледовых явлений.

1. Einleitung

Der Verlauf der Eisverhältnisse von Flüssen, die Bildung und Schmelze von Eis sind im wesentlichen Wärmehaushaltsprozesse, die durch Witterungsverhältnisse, sowie hydraulische und morphologische Gegebenheiten des Wasserraumes bestimmt sind. Für die Beschreibung der Wärmewirtschaft von Flüssen sind überaus viele Faktoren heranzuziehen, von denen zumeist nur Wassertemperatur, Lufttemperatur und Angaben über die Eisbeschaffenheit vorhanden sind.

Für die Vorhersage von Eiserscheinungen stehen im derzeitigen Stand unserer Kenntnisse - abgesehen von verschiedenen Näherungsverfahren - zwei Wege offen. Einmal kann eine physikalische Beschreibung erfolgen, die kausale Beziehungen untersucht und die die Prozesse beeinflussenden Faktoren berücksichtigt, andererseits lassen sich Eintritt und Eiserscheinungen über Methoden der mathematischen Statistik aus den verfügbaren Beobachtungen einschätzen.

Die Eiserscheinungen sind also durch alle wirkenden Faktoren beeinflusst, von denen aber allgemein nur Lufttemperatur, Wassertemperatur, Ort und Zeit registriert, die übrigen Faktoren hingegen außeracht gelassen werden, einfach aus dem Grund, daß ihre Bestimmung heute noch auf viel Schwierigkeiten stößt.

Offensichtlich kann die Eiserscheinung infolge Veränderlichkeit und komplizierter Wechselwirkung der unberücksichtigt gelassenen Einflußfaktoren von Fall zu Fall zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten, oder eventuell gänzlich entfallen. Die Eiserscheinungen zeigen somit Schwankungen zufälligen Charakters, verhalten sich also wie stochastische Veränderliche in der mathematischen Statistik. Dies wiederum besagt, daß der Eintritt von Eiserscheinungen ebenso über Verteilungsfunktionen erfolgen, wie bei allen

anderen hydrologischen Prozessen. Von diesen Überlegungen ausgehend wird eine Methode für die statistische Vorhersage von Eiserscheinungen gezeigt.

Bestimmung der für die Vorhersage von Eiserscheinungen erforderlichen theoretischen Lufttemperatursummen

Bei Bestimmung der theoretischen Lufttemperatursummen wird von der Annahme ausgegangen, daß es eine Konstante  $\alpha$  mit folgenden Eigenschaften gibt: beträgt die Wassertemperatur in einem gegebenen Zeitpunkt  $t_{v,0}$  und die mittlere Temperatur in den folgenden 24 Stunden  $t_{\ell,1}$ , dann wird die Wassertemperatur 24 Stunden später

$$t_{v,1} = t_{v,0} + \alpha (t_{\ell,1} - t_{v,0}); \quad (0 < \alpha < 1) \quad [1]$$

sein. Natürlich kann diese Bedingung nur so lange erfüllt werden, bis  $t_v > 0$ .

Zu einem gegebenen Zeitpunkt sei die Wassertemperatur  $t_{v,0}$  und die mittleren Tagestemperaturen in den nachfolgenden Tagen nacheinander  $t_{\ell,1}, t_{\ell,2}, \dots$ , dann wird gemäß dieser grundlegenden Annahme die Wassertemperatur einen Tag später

$$t_{v,1} = t_{v,0} + \alpha (t_{\ell,1} - t_{v,0}) = \alpha t_{\ell,1} + (1 - \alpha) t_{v,0} \quad [2]$$

zwei Tage später:

$$t_{v,2} = t_{v,1} + \alpha (t_{\ell,2} - t_{v,1}) = \alpha t_{\ell,2} + \alpha (1 - \alpha) t_{\ell,1} + (1 - \alpha)^2 t_{v,0} \quad [3]$$

n Tage später:

$$t_{v,n} = t_{v,n-1} + \alpha (t_{\ell,n} - t_{v,n-1}) = \alpha t_{\ell,n} + \alpha (1 - \alpha) t_{\ell,n-1} + \alpha (1 - \alpha)^2 t_{\ell,n-2} + \dots + \alpha (1 - \alpha)^{n-1} t_{\ell,1} + (1 - \alpha)^n t_{v,0} \quad [4]$$

betragen.

Da bei Berücksichtigung einer genügend langen Periode

$$(1 - \alpha)^n \rightarrow 0, \quad \text{wenn } n \rightarrow \infty$$

also  $(1 - \alpha)^n t_{v,0}$  Null zustrebt, also die ursprüngliche Wassertemperatur keinen Einfluß mehr auf Eintritt der Erscheinung ausübt, was mit anderen Worten bedeutet, daß - wenn die Lufttemperaturen der vorhergehenden Tage einer richtigen Periode entnommen werden - die anfängliche Wassertemperatur vernachlässigbar ist. Der Eintritt der Eiserscheinung wird lediglich von der Lufttemperatursumme beeinflusst; also kann die theoretische Wärmesumme folgendermaßen definiert werden:

$$T_v = \alpha t_{\ell,0} + \alpha (1 - \alpha) t_{\ell,1} + \alpha (1 - \alpha)^2 t_{\ell,2} + \alpha (1 - \alpha)^3 t_{\ell,3} \dots \quad [5]$$

worin  $t_{\ell,0}$  die tägliche mittlere Lufttemperatur jenes Tages bezeichnet, für dessen Ende die theoretische Wärmesumme berechnet werden soll,  $t_{\ell,1}, t_{\ell,2}, t_{\ell,3} \dots$  die mittleren Temperaturen an den vorhergehenden 1., 2. usw. Tagen bedeutet.

Wesentlich einfacher wird die Beziehung, wenn beide Seiten von Gleichung [5] mit  $\alpha$  dividiert werden und die Größe

$$\frac{T_v}{\alpha}$$

theoretische Lufttemperatursumme genannt wird, und zwar je nach dem Charakter der betreffenden Eiserscheinung eine für den Eintritt erforderliche theoretische negative bzw. positive Temperatursumme. In diesem Fall nimmt Gleichung 5 folgende Endform an:

$$T_{\ell} = t_{\ell,0} + (1-\alpha) t_{\ell,1} + (1-\alpha)^2 t_{\ell,2} + (1-\alpha)^3 t_{\ell,3} \dots \quad [6]$$

Für die Bestimmung der theoretischen Lufttemperatursumme wird natürlich auch ein konkreter  $\alpha$ -Wert benötigt. Dieser kann aus Wassertemperatur und Lufttemperaturdaten sehr leicht bestimmt werden. Sind nämlich die Wassertemperaturen am n-ten, n+1-ten, n+k-ten Tag  $t_{v,n}$ ,  $t_{v,n+1}$ , ...,  $t_{v,n+k}$ , die Lufttemperaturen hingegen  $t_{\ell,n}$ ,  $t_{\ell,n+1}$ , ...,  $t_{\ell,n+k}$ , dann errechnet sich  $\alpha$  aus der Beziehung

$$t_{v,n+1} = t_{v,n} + \alpha(t_{\ell,n} - t_{v,n}).$$

Also kann der Mittelwert der  $\alpha$  aus

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{k} \sum_{n=0}^k \frac{t_{v,n+1} - t_{v,n}}{t_{\ell,n} - t_{v,n}} \quad [7]$$

geschätzt werden. Zu bemerken ist, daß obwohl das  $\alpha$  eine bedeutende Rolle in der gesamten weiteren Berechnung spielt, das Ergebnis jedoch durch kleine Schwankungen des  $\alpha$  praktisch unbeeinflusst bleibt.

Für die Berechnung der theoretischen Temperatursummen genügt es, nur die ersten acht Glieder an der rechten Seite von Gleichung [6] zu berücksichtigen um die Berechnung im Bereich der Zeitpunkte von Eiserscheinungen für mehrere Tage vorzunehmen. Die Berechnung der theoretischen Temperatursummen zeigt Tab. 1.

#### Berechnung der theoretischen Temperatursummen

Jahr, Monat, Tag	$t_{1,0} / 1-0,2^m$								Theoretische Temperatursumme $T_1$
	$t_{1,0}$	$m=1$ 0,8	$m=2$ 0,64	$m=3$ 0,51	$m=4$ 0,41	$m=5$ 0,33	$m=6$ 0,26	$m=7$ 0,21	
1902									
XI. 11.	6,6	-	-	-	-	-	-	1,38	
12.	6,3	-	-	-	-	-	1,64	1,32	
13.	2,7	-	-	-	-	0,89	0,70	0,57	
14.	0,6	-	-	-	0,25	0,20	0,16	0,15	
15.	-1,2	-	-	-0,61	-0,40	-0,40	-0,31	-0,25	
16.	-0,6	-	-0,38	-0,31	-0,25	-0,20	-0,16	-0,13	
17.	-1,5	-1,20	-0,96	-0,76	-0,61	-0,50	-0,39	-0,31	
18.	-4,3	-3,44	-2,75	-2,19	-1,76	-1,42	-1,12	-0,90	-2,33
19.	-3,7	-2,96	-2,37	-1,89	-1,52	-1,22	-0,96	-0,78	-6,68
20.	-1,9	-1,52	-1,22	-0,97	-0,78	-0,63	-0,49	-0,40	-8,29
21.	-1,9	-1,52	-1,22	-0,97	-0,78	-0,63	-0,49	-0,40	-8,97
22.	-1,7	-1,36	-1,09	-0,87	-0,70	-0,56	-0,44	-0,36	-9,00
23.	-4,2	-3,36	-2,69	-2,14	-1,72	-1,39	-1,09	-0,88	-11,21
24.	-4,3	-3,44	-2,75	-2,19	-1,76	-1,42	-1,12	-0,90	-13,15
25.	-4,5	-3,60	-2,88	-2,30	-1,85	-1,48	-1,17	-0,94	-15,77
26.	-0,7	-0,56	-0,49	-0,36	-0,29	-0,23	-0,18	-0,15	-11,79
27.	-1,0	-0,80	-0,64	-0,51	-0,41	-0,33	-0,26	-0,21	-9,80
28.	0,9	0,72	0,58	0,46	0,37	0,30	0,23	0,19	-6,68
29.	0,2	0,16	0,13	0,10	0,08	0,07	0,05	0,04	-4,80
30.	2,2	1,76	1,41	1,12	0,90	0,73	0,57	0,46	-1,34

Anmerkung: Für den 18.XI.1902 beträgt die theoretische Temperatursumme

$$T_1 = -4,3 - 1,20 - 0,38 - 0,61 + 0,25 + 0,89 + 1,64 + 1,38 = -2,33$$

Betont sei, daß die theoretischen Temperatursummen oder deren  $\alpha$ -facher Wert nicht als eine theoretische Näherung der tatsächlichen Temperatursummen betrachtet werden darf (besonders nicht in der Nähe von  $0^0$ ). Die Zahlenwerte zielen darauf hin, den Einfluß der Lufttemperaturen auf die Wassertemperatur mit nur einer Zahl zu kennzeichnen.

Nimmt man als Intervall die Einheit der theoretischen Lufttemperaturen an, dann läßt sich weiterhin ermitteln, in wieviel Prozent der untersuchten Jahre die Eiserscheinungen an Tagen eingetreten sind, an denen die theoretische Lufttemperatursumme zwischen gegebenen Grenzen lag. Mit anderen Worten, man kann bestimmen, in wieviel Fällen in der Untersuchungsperiode bei gegebener theoretischer Lufttemperatursumme Eisgang, Eisstand, Abtrieb von Standeis und Eisschwund eingetreten sind, wie groß also die relative Häufigkeit der Erscheinungen war. Die relativen Häufigkeiten lassen sich desweiteren über Verteilungsfunktionen annähern.

Das Verhalten von Verteilungsfunktionen ist natürlich nicht allein von  $\alpha$  abhängig, sondern auch von jenen Einflußfaktoren — auch von der Natur —, die bei der Definition des  $\alpha$  außeracht geblieben sind. Die Verteilungsfunktionen vermitteln also ein Bild auch darüber, in welchem Maß das definierte  $\alpha$  trotz der Vernachlässigungen den physikalischen Prozeß charakterisiert.

#### Vorhersage von Eiserscheinungen

Somit haben wir ermittelt, mit welcher Wahrscheinlichkeit an einem gegebenen Tag bei gegebener theoretischer Temperatursumme eine Eiserscheinung erwartet werden darf.

Wie bereits erwähnt, kann infolge der vernachlässigten Einflußfaktoren die Eiserscheinung an einem gegebenen Tage, genauer bei einer hierfür berechneten theoretischen Temperatursumme, nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eintreten.

Wären bei der Definition sämtliche Einflußfaktoren berücksichtigt gewesen, dann würden sich mit unserem Rechenverfahren die Eiserscheinungen in jedem Jahr an bestimmten Tagen ergeben, also hätten wir eine deterministische Beziehung. Nun aber kann der Eintritt lediglich über Wahrscheinlichkeiten gekennzeichnet werden, die den theoretischen Lufttemperaturen zugeordnet sind.

Bei der Vorhersage von Eiserscheinungen erhält man wesentlich mehr Informationen, wenn geprüft wird, wie sich die Eintrittswahrscheinlichkeit an mehreren Tagen bei unterschiedlichen theoretischen Temperatursummen gestaltet.

Dies läßt sich folgendermaßen leicht errechnen. Beträgt die Eintrittswahrscheinlichkeit in einem Profil an einem gegebenen Tag 0,25, am nächsten Tag hingegen 0,52, dann ist die Wahrscheinlichkeit des Eisstands am gegebenen Tag  $1 - 0,25 = 0,75$ , daß jedoch das Eis am nächsten Tag nicht eintritt,  $1 - 0,52 = 0,48$ .

Daß der Eisstand an keinen der zwei Tagen eintritt, erfolgt (unter Voraussetzung der Unabhängigkeit) mit  $0,75 \times 0,48 = 0,36$  Wahrscheinlichkeit, während ein Eisstand an einem der zwei Tage oder spätestens am nächsten Tag eintritt,  $1 - 0,36 = 0,64$  Wahrscheinlichkeit hat.

Demgemäß können die Eiserscheinungen folgendermaßen vorausgesagt werden. Anhand Gleichung [6] werden die theoretischen Temperatursummen bestimmt. In Kenntnis der theoretischen Temperatursummen wird für die einzelnen Tage die Eintrittswahrscheinlichkeit berechnet. Im Besitz dieser Werte wird folgende Vorhersage der Eiserscheinung gegeben:

am  $i+k$ -ten Tag beträgt die Wahrscheinlichkeit

$$p = 1 - (1-p_i) \cdot (1-p_{i+1}) \cdot (1-p_{i+2}) \dots (1-p_{i+k}) \quad [8]$$

wo z.B. bei Eisstand  $i$  den ersten Tag bedeutet, wenn  $T_{\ell} < 0$ .

Zusammenfassend: wird bei der statistischen Vorhersage von Eiserscheinungen der Eintritt des Ereignisses derart angenähert, daß die Wahrscheinlichkeiten, die zum Eintritt an einem bestimmten Tag der einzelnen Jahre zugehören, kumuliert werden, so wird die Eintrittswahrscheinlichkeit an den aufeinanderfolgenden Tagen immer größer.

Offensichtlich wird bei einer besseren Näherung der Bereich der unabhängigen Variablen um den Eintrittstag immer enger.



DIE VORHERSAGE EINIGER ELEMENTE DES EISREGIMES AUF DER UNGARISCHEN DONAUSTRECKE

I. Zsuffa

ПРОГНОЗ ОБ ОТДЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ДВИЖЕНИЯ ЛЬДА НА ВЕНГЕРСКОМ УЧАСТКЕ ДУНАЯ

И. Жуффа

Zusammenfassung:

Schon seit längerer Zeit versuchen wir die qualitativen Werte der Eiserscheinungen (Anfang des Eistreibens, Eisstand, Eisaufbruch) vorherzusagen. Neuerdings haben wir auch eine Abschätzmethode zur Vorhersage des Eisstaues ausgearbeitet. Bei dieser Methode wird auf dem Wege der Messung und photooptischen Registrierung der Menge der abgehenden Eisfläche oder Eismasse pro Zeiteinheit eine Vorhersage über den Eisstand ermöglicht. Auf diese Weise wird der Einsatz der Eisbrecherflotte erleichtert.

Резюме:

Уже раньше мы попробовали сделать прогноз качественных стоимостей по данным прогноза ледяных явлений: мы составили метод оценки ожидаемых изменений уровня воды, используя непрерывность и геодезические съемки. По пути измерения и регистрирования стока ледяной поверхности или стока ледяной массы возможно дать прогноз об остановлении неподвижных ледяных полей. Наблюдения и их немедленно обрабатывание (после построения помощной таблицы) дает возможность за прогнозирование ледоставов, таким образом облегчает руководство работы ледокольной команды.

Einleitung

In der Donaustrecke zwischen Paks und der Dravemündung ist das Oberschwemmungsgebiet vor allem durch Eishochwasser gefährdet. Eishochwasser entstehen bekanntlich durch Eisbarrieren, die sich aufgrund des Vereisungszustands des Gewässers ausbilden. Man muß sich deshalb bei der Vorbereitung der Bekämpfung auf die Vorhersage der Eiserscheinungen stützen.

Die in Ungarn gebräuchliche Methode für die qualitativen Parameter der Eiserscheinungen und für die Vorhersage der Vereisung bzw. des Eisstandes wurden von Lászlóffy auf der zweiten Konferenz bereits vorgestellt, sowie die Hilfsmittel für die Vorhersage der Randkurve von Höchststandswerten beim Eishochwasser erläutert. Beim dritten Zusammentreffen in Bukarest haben wir unsere Hilfsmittel für die Vorhersage der Eishochwasserstände nach der Herausbildung isolierter Eisbarrieren vorgeführt, die aufgrund von geometrischen Daten des Flußbettes angefertigt wurden. Die passive Bekämpfung des eisartigen Hochwassers wurde jedoch durch die aktive Bekämpfung abgelöst: Einerseits verbessern wir durch Flußregulierungsmittel die Eisabführungsverhältnisse, andererseits verzögern bzw. verhindern wir den Eisstand mit Hilfe von Eisbrecherflotillen großer Kapazität, bzw. wird das Eis von unten zertrennt und abgeflößt. Sowohl die Flußregulierungsmittel als auch die Wirksamkeit des Eisbrechens mittels Schiffen kann erst dann analysiert werden, wenn wir die Bildung der Eisverhältnisse durch qualitative und quantitative Parameter charakterisieren. Mit der Einführung von Messungen der quantitativen Parameter der Eisverhältnisse haben sich Möglichkeiten der Vorhersage ergeben, mit deren Hilfe die Wirksamkeit des Eisbrechens vervielfacht werden kann.

Beobachtung von quantitativen Parametern der Eisverhältnisse

Die qualitativen Daten der Eiserscheinungen - der Zeitpunkt für das Erscheinen bzw. Verschwinden von Eis, für den Eisstand und für das Schmelzen der Eisdecke - sind seit mehr als 100 Jahren beobachtet worden. Als Ergebnis der Verarbeitung der so gewonnenen Datenreihen wurden die verschiedenen Strecken der Donau hinsichtlich des eisartigen Hochwassers klassifiziert. Auf Grundlage der Datenreihe wurden Verfahren für die Vorhersage erarbeitet, mit deren Hilfe unter Einschaltung von hydrometeorologischen Daten die zu erwartende Bildung von Eiserscheinungen - der Anfang des Eistreibens, des Eisstandes, des Eisaufbruches - vorhergesagt werden kann.

Die Notwendigkeit der quantitativen Charakterisierung ist schon nach dem Hochwasser von 1956 offenbar geworden. Die ungarischen Behörden haben daraufhin die Beobachtung und Messung vom prozentualen Verhältnis der Eisbedeckung des Flusses und von der Dicke der Schwimmschollen verordnet. Das Erfassen dieser schwer meßbaren Elemente durch objektive Meßverfahren ist erst nach Jahrzehnten möglich geworden: Die Dicken von Eisschollen sind nur durch Stichprobenentnahme von Eisbrechern ausreichend bestimmbar. Anstatt der unzuverlässigen Beobachtung mit freiem Auge vom Ufer her, haben wir im Jahre 1972 die Datenerfassung von höher liegenden Beobachtungspunkten durch fotooptische Mittel eingeführt.

Die Eisbedeckung hat den Charakter einer zufälligen Variablen, sie benötigt also auch eine statistische Probeentnahme. Es wurde deswegen vorgeschrieben, daß der Beobachter anstatt einer einzigen Aufnahme zu bestimmten Zeitpunkten 10 - 30 Aufnahmen machen soll. Auf Grundlage der perspektivischen Aufnahmen ist durch die einfachen und bekannten konstruktionstechnischen Mittel der Fotogrammetrie der zuverlässige Wert der Eisbedeckung einfach bestimmbar. Die einfache Analyse der vom Fixpunkt in gleichen Zeitintervallen angefertigten Aufnahmen hat die Bestimmung der Geschwindigkeitsvektoren der Eisschollen ermöglicht.

Anschließend kann die Eisoberflächenausbeute in  $m^2/s$ , ähnlich wie bei der klassischen Durchflußmessung, aufgrund der Aufnahmen leicht ausgerechnet werden. Die Eismassenausbeute, die sich als Produkt von Eisoberflächenausbeute und Eisdicke ergibt, kann auch einfach ausgerechnet werden (Abb. 1 und 2).

Die Auswertung der Daten ist nicht kompliziert aber langwierig. Die Aufnahmen müssen vergrößert werden. Dann muß mit Hilfe eines entsprechend dichten Netzes die Eisbedeckung flächenweise abgemessen und die sich nach unten bewegenden Eisschollen auf den nacheinanderfolgenden Aufnahmen verglichen werden. Die Berechnungen müssen stationsweise und täglich durchgeführt werden, da die quantitativen Werte der Eisbeobachtungen den Charakter einer zufälligen Variablen haben.

Wegen des großen Arbeitsaufwandes war die manuelle Verarbeitung von 1972-73 mindestens um 10 Tage langsamer als die Beobachtung gewesen. Die Möglichkeiten der Vorhersage mit Hilfe der Daten können nur durch eine bedeutende Reduzierung des Verarbeitungsaufwandes ausgenutzt werden. Die Verkürzung der Bearbeitungszeit kann nur durch eine allmähliche Automatisierung verwirklicht werden.

#### Die Eisbeobachtungen und die Automatisierung der Datenverarbeitung

Zuerst wurde die Bestimmung der Eisbedeckung mittels Aufnahmen automatisiert. Die Aufnahmen wurden auf durchsichtige Folie kopiert und auf Bildschirm übertragen (Abb. 3). Zwischen dem Fernseh-Aufnahmegerät und dem Bildschirm ist ein Bildtransformator eingeschaltet, mit dessen Hilfe anstatt des Schattenbildes ein schwarz-weiß Kontrastbild herstellbar ist. Das Verhältnis der schwarzen und weißen Flecken des Kontrastbildes kann mit Hilfe eines drehbaren Knopfes verändert werden. Mit diesem Knopf wird das Kontrastbild visuell so eingestellt, daß die auf dem beleuchteten Bild 1 (Abb. 3) sichtbare Wasseroberfläche auf ein gleich großer und gleichförmiger schwarzer Fleck auf dem Kontrastbild 2 (Abb. 3) erscheint. Nachher kann die prozentuale Eisbedeckung, auf dem Umwandlungsapparat 3 (Abb. 3) als elektrischer Parameter abgelesen werden (Abb. 4). Um die perspektivischen Verzerrungen auszuschalten, werden die Trapeze der entsprechenden Felder des geodesischen Netzes mit Masken begrenzt.

Eine weitere Fortentwicklung der Automatisierung besteht darin, daß der Fernseh-Aufnahmeapparat unmittelbar auf die Wasseroberfläche gerichtet wird, und die Eiserscheinungen auf zwei Bildschirmen - auf einem Schatten- und auf einem Kontrastbild - beobachtet werden können. Bei dieser Lösung kann die Entwicklungszeit der Bilder eingespart werden. Die Werte der Eisbedeckung können nach dem Einstellen spurweise, unmittelbar abgelesen werden. Die Bestimmung der Geschwindigkeitswerte erfolgt mittels Stoppuhr durch visuelle Verfolgung der Eisschollen auf den gegebenen Spuren. Der Nachteil der Einrichtung besteht darin, daß die Daten nicht rekonstruiert werden können. Der Einsatz eines Telerekorders verteuert bedeutend den Ausbau solcher Beobachtungsstationen. Deswegen wurde auch eine Super 8-Filmkamera parallel zur Fernsehkamera eingesetzt, die täglich um 13.00 Uhr, bzw. bei der besten Beleuchtung auf fotoelektrischem Wege automatisch das Programm einschaltet. Mit Hilfe dieses Programmes können neben dem laufenden einminütigen

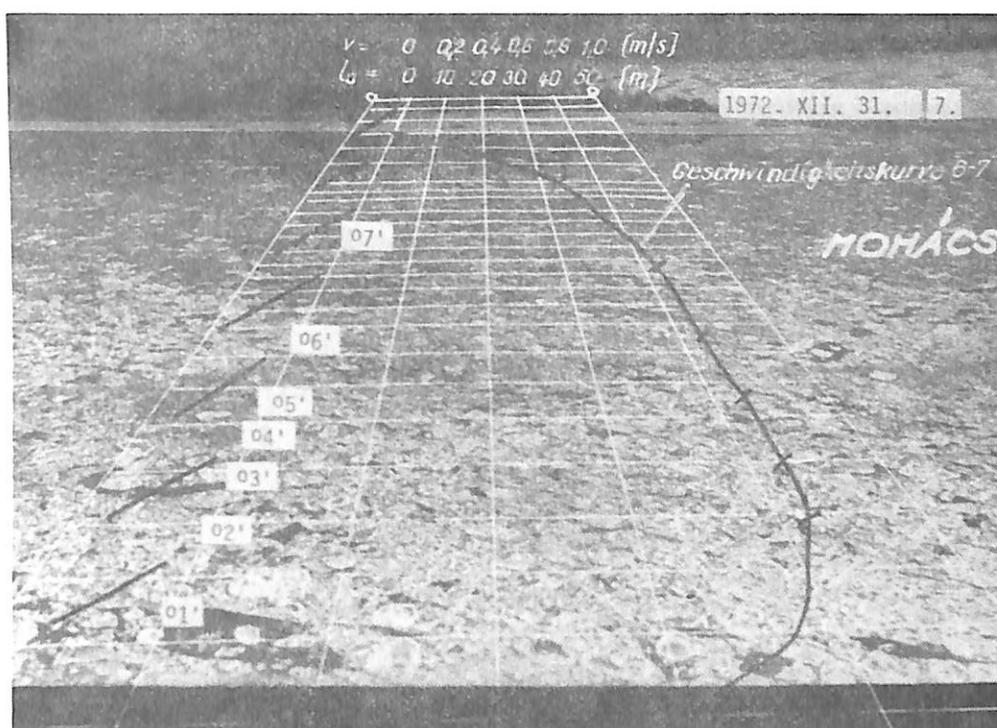


Abb. 1: Eisbeobachtung vom 31.12.1972, siebente Aufnahme in der Reihenfolge. Die charakteristischen Punkte, die auf der Bezugslinie mit Nullkreisen bezeichnet wurden, können auf der achten Aufnahme (Abb. 2) identifiziert werden.

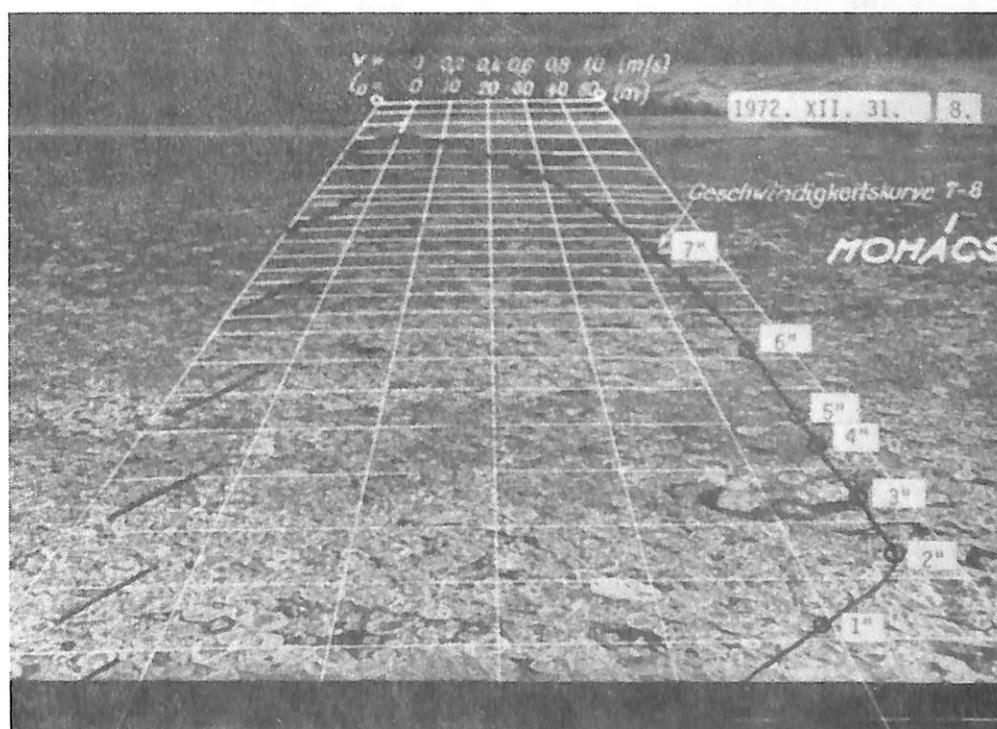


Abb. 2: Eisbeobachtung vom 31.12.1972, achte Aufnahme in der Reihenfolge. Die mit  $\otimes$  bezeichneten Punkte des benetzten Feldes sind die auf der Bezugslinie eingezeichneten charakteristischen Eisschollen auf der siebenten Aufnahme. (Abb. 1). Diese Punkte  $v$  ergeben unmittelbar das Geschwindigkeitsbild. Da die Zeit zwischen den Aufnahmen 50 Sekunden beträgt, und die Bezugslinie eine Länge von 50 Meter hat, können die Geschwindigkeitswerte von der Abb. unmittelbar in m/s abgelesen werden.

Exponieren in 10 Sekunden 30 Einzelaufnahmen und in einer Minute weitere 30 Aufnahmen angefertigt werden. Das Programm kann auch auf externem Befehl eingeschaltet werden. Diese Anlage konnte diesen Winter aus Mangel an Eis nicht ausprobiert werden.

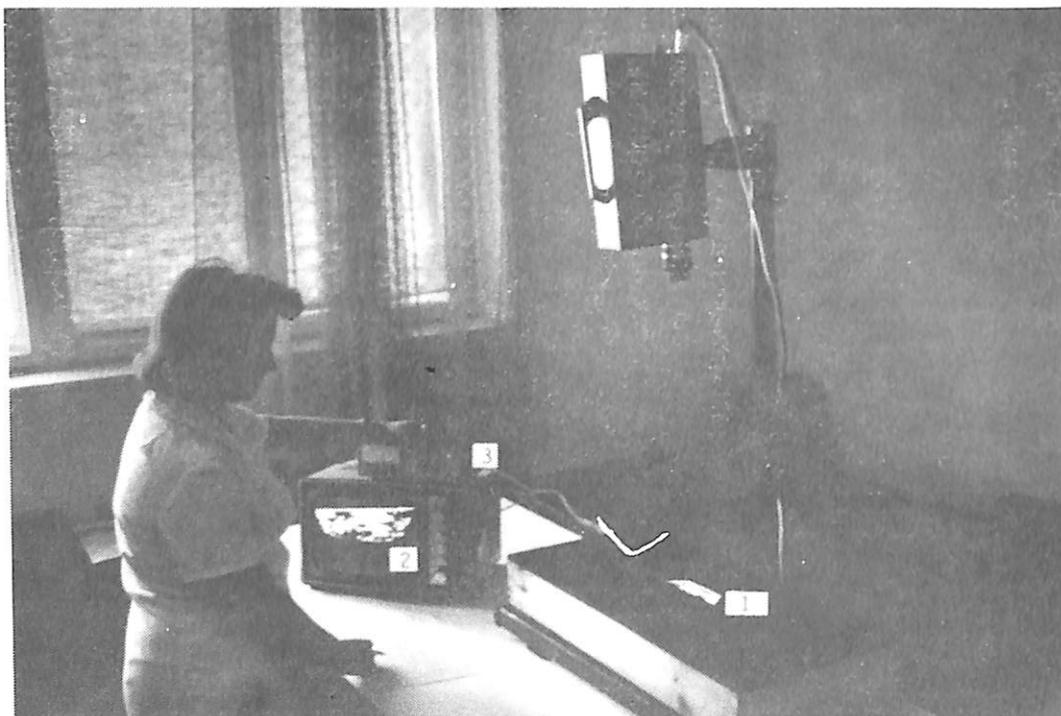


Abb. 3: Der Auswertungsautomat: 1 das auszuwertende Lichtbild  
2 Fernsehbild mit Kontrast  
3 Auswertegerät mit Signalaussender- und Kontrasteinstellerknöpfe

Die vollständige Automatisierung wird zur Zeit entwickelt: Künftig soll die Bewegung der Eisschollen an der Beobachtungsanlage automatisch durch einen elektrischen Punkt verfolgt werden. Dabei wird das Produkt von Eisbedeckung und Geschwindigkeitswerten sowie dessen laufender zeitlicher Durchschnitt mit Hilfe von elektrischen Stromkreisen berechnet. Die Werte der Eisbedeckung und der Eisoberflächenausbeute wird von der Maschine signiert und registriert.

Die Entwicklung dieser Anlage verzögerte sich wegen des "ungünstigen" Winters.

Mit Hilfe der in 1973-74 erprobten und inbetriebgesetzten Anlage konnte die Verarbeitungszeit der Daten eines Tages von 40 auf 6 Arbeitsstunden gesenkt werden. Wir hoffen, daß mit den eingesetzten Fernsehkameras die Verarbeitungszeit auf eine Stunde reduziert werden kann. Die zur Zeit noch in der Entwicklung stehende Anlage kann schon ausgewertete und verarbeitete Daten liefern.

Auf der vorgenannten Beobachtungsstrecke der Donau sind 5 Eisbeobachtungsstationen in Betrieb gesetzt worden:

Bei Dunaföldvár	Flußkilometer	1560 + 400
Bei Paks	Flußkilometer	1533
Bei Baja	Flußkilometer	1480
Bei Dunaszekcső	Flußkilometer	1460 + 800
Bei Mohács	Flußkilometer	1448 + 800

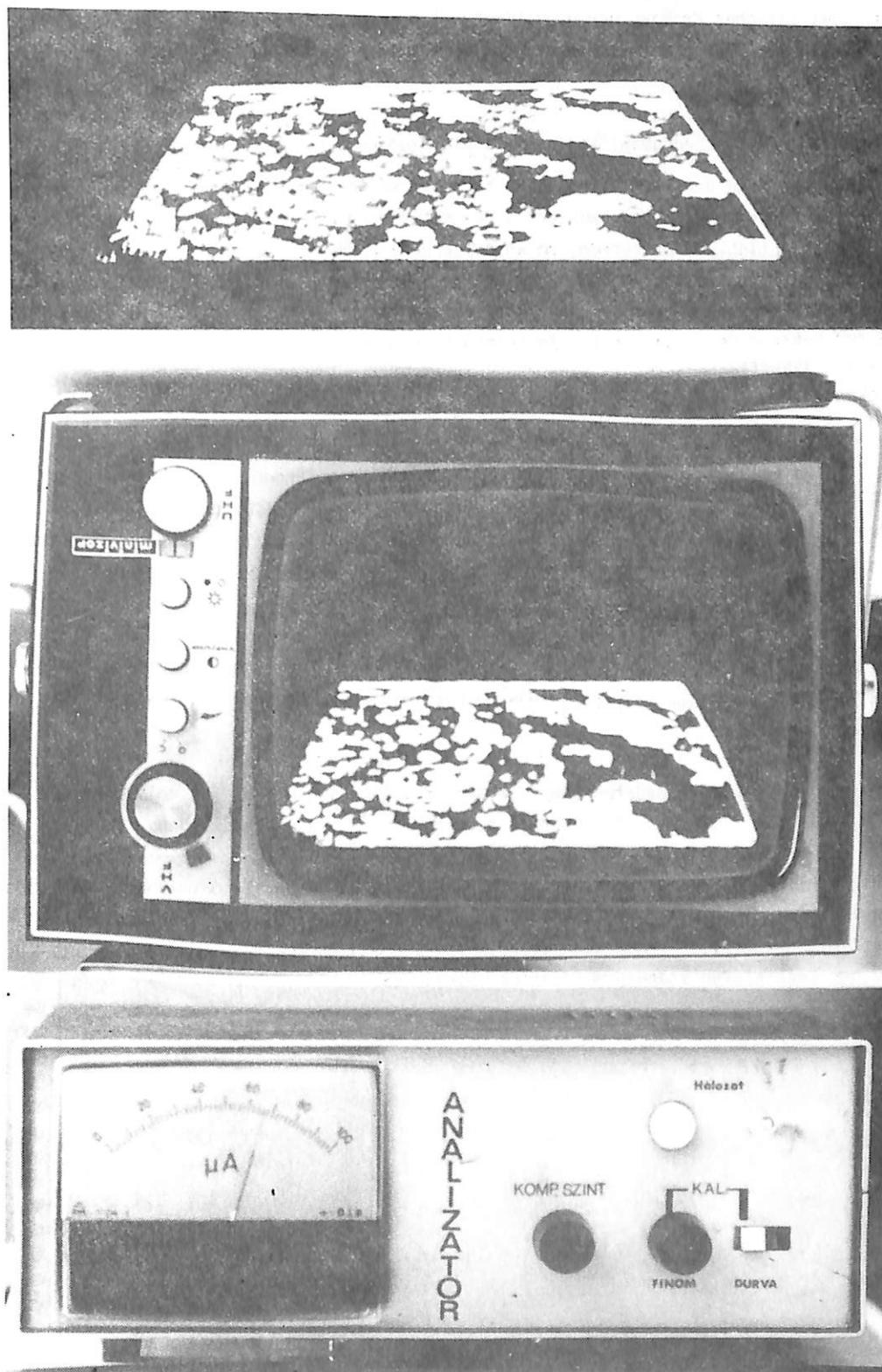


Abb. 4: Das zusammenhängende Lichtbild und das Kontrastbild, das ergebnisanzeigende Gerät.

Als Beispiel sind die 1972-73 beobachteten Daten in der Abb. 5 zusammengefaßt. In der Abbildung wurden neben den laut statistischer Probeentnahme bestimmten täglichen Durchschnitten auch die Streuungen, die zulässigen Toleranzen vom Umfang der Proben und von der Streuung errechnet und einige hydrometeorologische Faktoren aufgetragen.

#### Die Verwendung der beobachteten quantitativen Eisdaten zur Vorhersage

Die beobachtete Datenreihe der 5 Stationen kann auch bei kälterem Winter erst nach Jahren so ausgewertet werden, daß zur Vorhersage des Eishochwassers außer meteorologischen Daten auch die Eisdaten höher liegender Profile berücksichtigt werden können, um so entsprechend dem Charakter der Erscheinungen Hilfsmittel für die Vorhersage auf statistischem Wege anzufertigen. Das schon zur Zeit zur Verfügung stehende Beobachtungs- und Auswerteverfahren eignet sich zur Vorhersage einiger grundlegender Daten zur aktiven Eiskämpfung und zur Lenkung des Eisbrechers. In Kenntnis der morphologischen Daten des Flußbettes und aufgrund der ablaufenden Eisoberflächenausbeute kann der zeitliche Ablauf der stauungsfreien Entwicklung des sich nach der Stockung herausgebildeten Eisfeldes vorhergesagt werden.

Abb. 6 zeigt die integrierte Linie der Donauwasseroberfläche angefangen von der Landesgrenze bei verschiedenen Wasserständen. Die den verschiedenen Eisoberflächenausbeuten entsprechenden Radienreihen, die zu den entsprechenden Punkten des Eis- und Wasserstandes zugeordnet, bzw. auf Transparentpapier aufgezeichnet sind, ergeben sich durch einfache Projektion. So kann bestimmt werden, wo sich der oberste Punkt von der obersten Kante des Eisfeldes nach 1, 2, ..... n Stunden befindet.

Mit Hilfe der Abbildungen und in Kenntnis der unteren und oberen Kante des Eisfeldes, sowie der Eismassenausbeute in  $\text{m}^3/\text{s}$  kann das Volumen des entstandenen Eispfropfens ausgerechnet, sowie der Durchflußquerschnitt geschätzt werden.

Auf der Grundlage der Wasserstandsdaten kann die Wasserdurchlässigkeit und anschließend die Wasserstandserhöhung des Oberwassers - wie z.B. in Bukarest gezeigt wurde - geschätzt werden.

Die rechtzeitige Auswertung der Beobachtungsdaten kann nur durch schnelle Datenübertragung, Datenverarbeitung und Erstellung der Vorhersage gesichert werden. Das ermöglicht ein gut funktionierendes Funknetz: Sowohl das Schiff mit der Eisschollendickenmessung, als auch die Warnzentrale und die Schutz- und Eisbrecherflotille sind per Funktelefon ständig miteinander verbunden.

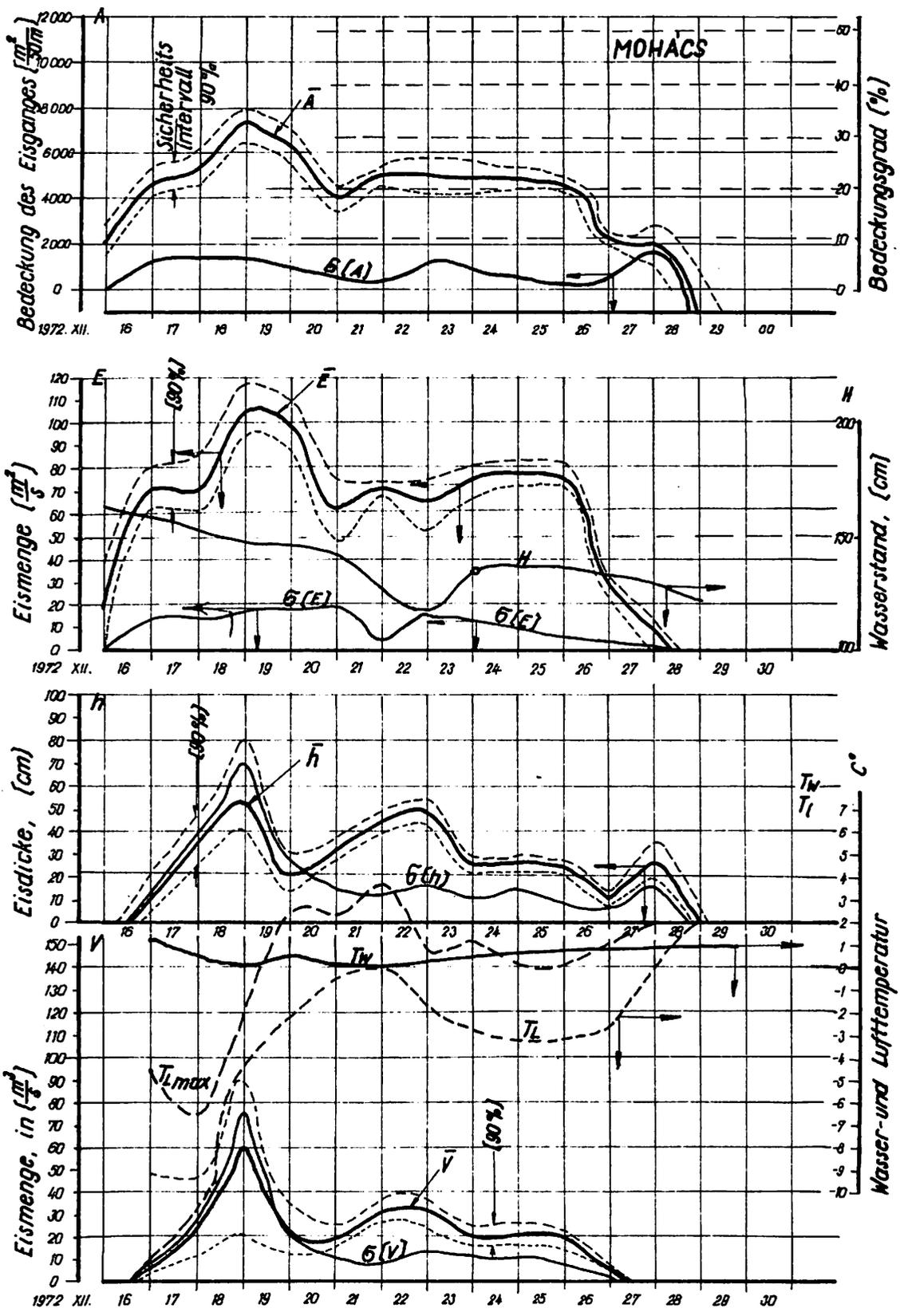


Abb. 5: Beobachtete Daten 1972/73

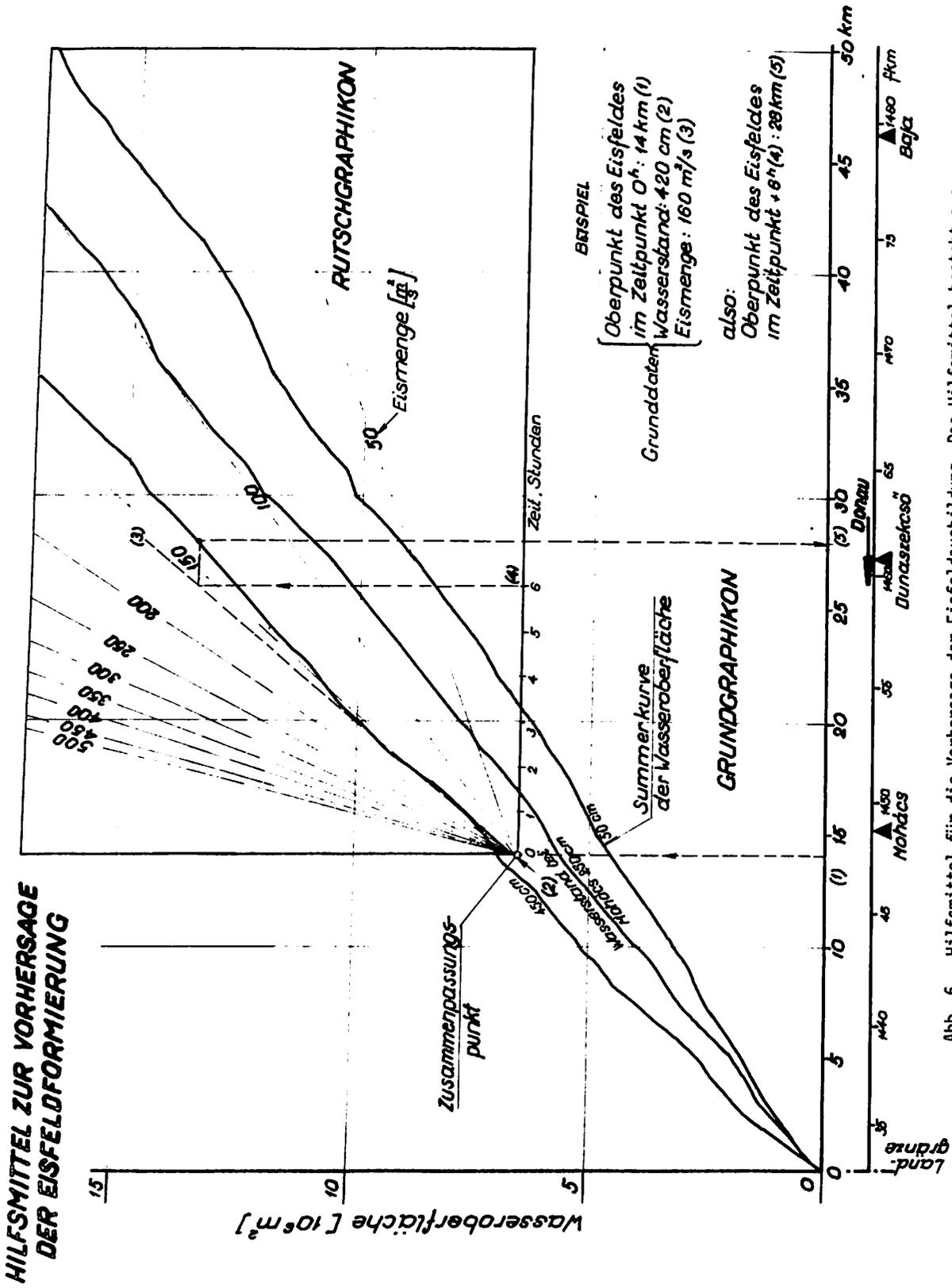


Abb. 6 Hilfsmittel für die Vorhersage der Eisfeldausbildung. Das Hilfsmittel besteht aus zwei Blättern. Der graphische Fugenpunkt des verschiebbaren Graphikons, der auf ein durchsichtiges Papier gedruckt ist, wird auf die entsprechenden Punkte des Eis- und Wasserstandes angepaßt. Als Illustration wurde das verschiebbare Graphikon entsprechend des Musterbeispiels auf das Grundgraphikon übertragen.

## 8. DISKUSSION

Timtschenko:

Kollegen Täubert möchte ich fragen:

1. Wodurch unterscheiden sich Ihre Untersuchungen der Wärmebilanz von ähnlichen früher durchgeführten Arbeiten, z.B. Untersuchungen sowjetischer Wissenschaftler (Schuljakowskij, Kolesnikow u.a.), und was enthalten Ihre Untersuchungen an Neuem?
2. Wird Ihre Methode der Berechnung und der Vorhersage in der Praxis angewandt? Wie sind die Ergebnisse?

Täubert:

Zu 1.: Das Neue bei der Durchführung meiner Forschungen liegt nicht so sehr im Modell des Haushaltes, also der naturwissenschaftlichen Beschreibung der Energieaustauschvorgänge, sondern vielmehr in der Entwicklung der praktischen Verwendbarkeit dieser physikalischen Gleichungen insbesondere durch den Aufbau eines sehr aufwendiges Modells der Datenaufbereitung für Ingenieurplanungen. (Vgl. Vortragstext, Abschn.3.2 und - ausführlicher - Lit. 4).

Zu 2.: Die vorgeführte Fallstudie wurde tatsächlich aufgrund von gemessenen Daten durchgeführt. Die Eichung des Modells war bezüglich der Wassertemperatur quantitativ möglich und erfolgreich; bezüglich der Eisvolumina war sie nur qualitativ möglich, da exakte Eismessungen fehlten, und nur Beobachtungsprotokolle vorlagen (Randeis, Eisstand, u.ä.). Die geplante Maßnahme ist bis heute nicht durchgeführt und deshalb konnten ihre vorhergesagten Auswirkungen noch nicht überprüft werden. Die Methode wird auch bei Berechnung der Auswirkungen von Kühlwassereinleitungen in Deutschland angewendet. Die Ergebnisse leiden noch am Mangel exakter Eingabedaten und an der Vielzahl der deshalb benötigten Annahmen.

Burz:

Im Referat von Täubert wurde auf die Bedeutung der Strahlungsbilanz hingewiesen. Bekanntlich bereitet die direkte Messung als auch die indirekte Berechnung erhebliche Schwierigkeiten. Wie wurde im vorliegenden Fall die Strahlungsbilanz ermittelt?

Täubert:

Zur Frage der Problematik der Strahlungsbilanz als Wärmehaushaltsfaktor sei auf die Literaturangabe 4 zum Vortrag hingewiesen, in der sehr ausführlich die herkömmlichen Berechnungsgleichungen kritisiert wurden und die Berechnungsmöglichkeiten über Multiregressionsmodelle nachgewiesen wird. Für die Anwendung in der Fallstudie wurde aus kurzzeitigen Messungen der Strahlungsbilanz (Stundenmittel als Differenz der "Strahlung von oben" und der "Strahlung von der Wasseroberfläche") und Messung der meteorologischen Daten einer nahen Wetterstation eine Multiregressionsgleichung aufgestellt. Ober diese Gleichung wurde dann aus den meteorologischen Datenreihen lange Reihen der Strahlungsbilanz errechnet.

Täubert:

Allgemein sei zur Ergänzung noch folgendes angemerkt.

1. Das Modellsystem ist über die Fallstudie im Vortrag hinaus auch für Untersuchungen aller anderen anthropogenen Einflüsse, z.B. Stauregelung, Abwasser- und Kühlwassereinleitungen, anwendbar.
2. Die Auswirkungen von Abwassereinleitungen und biologisch-chemischen Reaktionen beim Abbau von Verschmutzungen im Fluß sind in einer Studie der Firma Motor-Columbus (Schweiz) für den Rhein abgeschätzt worden.

3. Die Frage der Einleitung von Wärme mit dem Kühlwasser von thermischen Kraftwerken und ihr Einfluß auf Wärmehaushalt und Vereisung wird in Deutschland sehr intensiv untersucht. Für alle großen Flüsse existieren "Wärmelastpläne". Darin ist die Ausnutzung der Wärmeaufnahmefähigkeit des Flusses durch Kühlwassereinleitungen für Gegenwart und Zukunft dargestellt. Der vorhin geäußerten Anregung eines ungarischen Kollegen, doch bei der nächsten Tagung mehr über diesen Problemkreis zu berichten, folge ich gerne mit dem Angebot, als Vertreter einer der größten deutschen Firmen, die Wärmekraftwerke bauen und betreiben, bei der IX. Tagung mit einem Beitrag zur Verfügung zu stehen.

## В. Д И С К У С С И Я

Тимченко:

Вопросы к коллеге Тойберту:

1. Чем отличается и что нового в Вашем исследовании теплового баланса в сравнении с подобными работами, выполненными ранее, в частности, работами советских ученых (Шуляковский, Колесников и др.)?
2. Применяется ли на практике Ваш способ расчета и прогноза? Каковы результаты?

Тойберт:

К 1.: Новое в проведении моего исследования не находится в большой степени в модели теплового баланса, т.е. в естественно-научном описании протекания энергообмена, а значительно больше в развитии практической приложимости этих физических равенств, особенно посредством дорогостоящей модели предварительной обработки данных для инженерных планировок. (Ср. текст доклада, раздел 3.2 и, более подробно, лит.4).

К 2.: Представленное случайностное исследование проводилось фактически на основе измеренных данных. Эталонирование модели оказалось, в отношении температуры воды, количественно возможным и успешным; в отношении ледяного массива оно было возможно лишь количественно, т.к. не доставало точных ледяных измерений и имелись лишь наблюдений (краевой лед, ледяное состояние и т.п.). Запланированное мероприятие до сих пор не было проведено и поэтому еще не смогли быть проверены предсказанные его действия. Методика применяется и при расчетах последствий охладительноводных введений в Германии. Результаты еще страдают вследствие нехватки точных вводных данных и вследствие многочисленности, требуемых поэтому приемов.

Бурц:

В реферате Тойберта указывалось на значение баланса излучения. Как известно, прямые измерения, как и косвенные расчеты, вызывают повышенные трудности. Как устанавливался в представленном случае баланс излучения?

Тойберт:

По вопросу проблематики излучения, как фактора теплового баланса, указано на литературное сведение 4 к докладу, в котором чрезвычайно обстоятельно критикуются обычные расчетные уравнения и показываются расчетные возможности посредством мультирегрессиональной модели. Для приложения в случайностном исследовании из кратковременных измерений баланса излучения (среднее в течении часа как разность "излучения сверху" и "излучения поверхностного слоя воды") и из измеренных метеорологических данных одной близлежащей станции погоды было составлено мультирегрессиональное уравнение. С помощью этого уравнения рассчитывались затем из рядов метеорологических данных длинные ряды баланса излучения.

Тойберт:

В общем, в качестве дополнения, можно заметить еще следующее:

1. Модельная система, кроме случайностного исследования, приведенного в докладе, приложена также и при исследованиях всех других антропогенных влияний, например регулировка подпоров, сточноводные и охладительноводные введения.
2. Влияние сточноводных введений и биолого-химических реакций при усилиях по уменьшению загрязненности в реке оценены для Рейна в исследовании фирмы Мотор-Колумбус (Швейцария).
3. Вопрос введения теплоты вместе с охладительной водой термических силовых станций и ее влияние на тепловой баланс и оледенение интенсивно исследуется в Германии. Для всех больших рек существуют "планы тепловой нагрузки". В них изложено использование способностей реки принимать тепло через охладительноводные введения в настоящем и в будущем. До этого не скрывавшему свое беспокойство венгерскому коллеге - все же на последующей конференции сделать побольше сообщений по этому кругу проблем - я охотно последую с предложением, как представитель одной из крупнейших немецких фирм, строящих и эксплуатирующих тепловые силовые установки, представиться в распоряжение IX-ой конференции вместе с соответствующим вкладом.



VORHERSAGEVERFAHREN FÜR DIE BILDUNG bzw. AUFLÖSUNG EINER EISDECKE AUF DER UNTEREN DONAU  
IN ABHÄNGIGKEIT VON LUFTTEMPERATUR UND ABFLUSS

P. Mita

МЕТОД ПРОГНОЗА ОБРАЗОВАНИЯ ИЛИ ОТТАИВАНИЯ ЛЕДОСТАВА НА НИЖНЕМ  
ДУНАЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА И СТОКА ВОДЫ

П. Мита

Zusammenfassung:

Die Vorhersagemethode der Entstehung der Eisdecke beruht auf der Bestimmung der täglichen Abnahmegradienten der Wassertemperatur (Grad/Tag) bei drei hydrometrischen Stationen der unteren Donau: Tulcea, Cernavodă, Giurgiu.

Diese Gradienten wurden aufgrund der Abkühlungsperioden des Wassers für folgende Werte bestimmt: 3,5°C; 3,0°C; 2,5°C; 2,0°C; 1,5°C; 1,0°C bis zu 0°C, wenn im allgemeinen bei den erwähnten Stationen die Eisdecke entsteht.

Der tägliche Abnahmegradient der Wassertemperatur (Grad/Tag) ist das Verhältnis zwischen der Wassertemperatur an einem gegebenen Zeitpunkt und der Tageanzahl seit dem Messen dieser Temperatur bis zu 0°C.

Als Ergebnis erhielt man folgende Beziehungen:

$$\lambda_{\bar{t}_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}}, \bar{Q}) \quad \text{und} \quad \lambda_{T_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}}, \bar{Q})$$

hierbei bedeuten:

$$\begin{aligned} \lambda_{\bar{t}_0} \quad \text{und} \quad \lambda_{T_0} &= \text{der mittlere, bzw. der Höchst-Abnahmegradient der Wassertemperatur} \\ \bar{t}_{\text{Luft}} &= \text{mittlere Lufttemperatur} \\ \bar{Q} &= \text{mittlerer Abfluß der betreffenden Intervalle} \end{aligned}$$

Diese Beziehungen können bei einer Vorhersage angewendet werden, wenn die Wassertemperatur zum entsprechenden Zeitpunkt sowie der wahrscheinliche Gang der Lufttemperatur und der Abflüsse für die nächste Zeitspanne bekannt sind.

Резюме:

Метод прогноза ледостава основывается на определении ежедневного градиента спада температуры воды (град./день) на 3-х гидротехнических станциях нижнего Дуная: Тульча, Черна Вода, Джурджу.

Эти градиенты были определены в периоду охлаждения воды, определенные с момента, когда температура воды была: 3,5°; 3,0°; 2,5°; 2,0°; 1,5°; 1,0° и до нуля, когда обычно на станции образуется ледостав.

Ежедневный градиент спада температуры воды представляет соотношение температуры воды в определенный момент с момента регистрации этой температуры и до нуля градусов.

Были получены следующие уравнения:

$$\lambda_{\bar{t}_0} = f(\bar{t}_{\text{воз}}, \bar{Q}) \quad \text{и} \quad \lambda_{T_0} = f(\bar{t}_{\text{воз}}, \bar{Q})$$

$$\begin{aligned} \text{где } \lambda_{\bar{t}_0} \quad \text{и} \quad \lambda_{T_0} & \text{представляет средний градиент соответственно максимальный градиент температуры воды характерный всем интервалам охлаждения воды, а} \\ \bar{t}_{\text{воз}} \quad \text{и} \quad \bar{Q} & \text{представляют среднюю температуру воздуха и средний расход воды за соответствующий период.} \end{aligned}$$

Эти соотношения могут быть использованы для прогноза в том случае, когда известна температура воды в момент составления прогноза и возможная эволюция температуры воздуха и расхода воды для следующего периода.

1. Über die Entstehung der Eisdecke

Die Eisdecke entsteht auf der unteren Donau mit einer Häufigkeit von 34 - 66% (34,1% bei Giurgiu, 65,9% bei Cernavodă, 58,5% bei Tulcea).

Als eine Besonderheit dieser Eisdecke sei hier erwähnt, daß sie auf der unteren Donau in einem der Flußrichtung entgegengesetzten Sinne entsteht, d.h. flußabwärts - flußaufwärts, was sowohl auf die atmosphärischen Strömungen als auch auf die geringeren Abflüsse und Geschwindigkeiten entlang der Donauarme zurückzuführen ist.

Die Eisdecke bildet sich nach einer längeren Zeitspanne negativer Lufttemperaturen, die eine Abkühlung des Wassers bis nahe zum Nullpunkt ( $0^{\circ}\text{C}$ ) verursachen. Im allgemeinen entsteht die Eisdecke durch Vereinigung der Eisschollen in jenen Abschnitten, wo der Strom Inseln umfließt, bei Verengungen des Strombettes, Krümmungen, usw.

Die Abkühlung des Donauwassers erfolgt ziemlich langsam, da eine riesige Wassermenge am Wärmeaustausch beteiligt ist.

Bei mittleren Tageswerten der Lufttemperatur von  $-9$  bis  $-10^{\circ}\text{C}$  z.B., sinkt die Temperatur des Wassers des Tulceaarms bei Tulcea von  $2^{\circ}\text{C}$  auf  $0^{\circ}\text{C}$  in ca. 7-8 Tagen, von  $3^{\circ}\text{C}$  auf  $0^{\circ}\text{C}$  im Durchschnitt in 9-10 Tagen.

In Abb. 1 ist der Gang der Wasser- und Lufttemperaturen bei der Station Tulcea im Winter 1949-1950 dargestellt. Die Abhängigkeit der Schwankungen der Wassertemperatur von denen der Lufttemperatur ist offensichtlich.

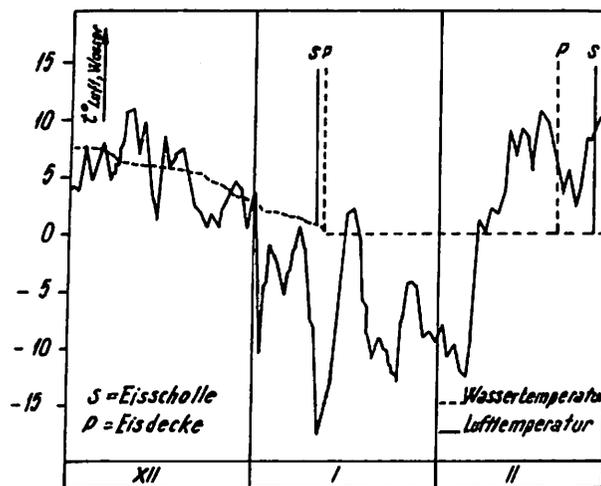


Abb. 1

Gang der Wasser und Lufttemperatur bei Tulcea  
im Winter 1949-1950

## 2. Kriterien der Vorhersagemethode

Die Zeitintervalle von 5-15 Tagen, die notwendig sind, damit bei negativen Lufttemperaturen die Wassertemperatur von  $2^{\circ}$ ,  $3^{\circ}\text{C}$  usw. bis auf  $0^{\circ}\text{C}$  sinkt, wurden als günstig betrachtet, sowohl vom praktischen Standpunkt her, als auch wegen einer größeren Präzision der meteorologischen und hydrologischen Vorhersage.

## 3. Analyse der Faktoren, die die Abkühlung des Wassers hervorrufen

Die Lufttemperatur wurde als der wichtigste Faktor betrachtet, der die Wassertemperatur beeinflusst. Der Abfluß (die sekundliche Wassermenge) wirkt sich ebenfalls auf den Gang der Wassertemperatur aus. Wegen ihrer Bedeutung wurde diesen beiden Faktoren die größte Aufmerksamkeit geschenkt.

Laut denen bei Punkt 2. angeführten Kriterien wurden als wahrscheinliche Vorhersagemomente folgende Temperaturmessungen festgesetzt:  $3,5^{\circ}\text{C}$ ,  $3,0^{\circ}\text{C}$ ,  $2,5^{\circ}\text{C}$ ,  $2,0^{\circ}\text{C}$ ,  $1,5^{\circ}\text{C}$ ,  $1,0^{\circ}\text{C}$ .

Die Abkühlungsperioden des Wassers, die der Eisdeckebildung vorausgehen und die nach dem Gang der Lufttemperatur und des Abflusses analysiert wurden, waren:

3,5 <sup>0</sup> C	bis	0 <sup>0</sup> C
3,0 <sup>0</sup> C	bis	0 <sup>0</sup> C
2,5 <sup>0</sup> C	bis	0 <sup>0</sup> C
2,0 <sup>0</sup> C	bis	0 <sup>0</sup> C
1,5 <sup>0</sup> C	bis	0 <sup>0</sup> C
1,0 <sup>0</sup> C	bis	0 <sup>0</sup> C

Für jede dieser Perioden wurden bei den hydrometrischen Stationen Tulcea, Cernavodă und Giurgiu folgende Parameter bestimmt:

- mittlere Lufttemperatur ( $\bar{t}_{\text{Luft}}$ )
- mittlerer Abfluß ( $\bar{Q}$  m<sup>3</sup>/s)
- Anzahl der Tage (N)

Mit Hilfe dieser Parameter wurden bei den erwähnten Stationen Beziehungen des Typs:

$$N = f(\bar{t}_{\text{Luft}}, \bar{Q})$$

erhalten, die jede Abkühlungsperiode charakterisieren.

In Abb. 2 ist als Beispiel der Fall Tulcea dargestellt.

N ist die Anzahl der Tage vom Zeitpunkt des Aufzeichnens der Werte 3<sup>0</sup>C und 2,5<sup>0</sup>C für die Wassertemperatur bis zur Entstehung der Eisdecke.

$\bar{t}_{\text{Luft}}$  ist die mittlere Lufttemperatur der betreffenden Zeitabschnitte.

$\bar{Q}$ (m<sup>3</sup>/s) ist der mittlere Abfluß.

Wie aus der Abbildung hervorgeht, wurden außer der mittleren Kurve auch noch 2 Grenzkurven eingetragen, die für jede Abkühlungsperiode die kleinste, bzw. größte Tagesanzahl begrenzen, die für die Entstehung der Eisdecke bei verschiedenen Lufttemperaturen notwendig ist.

Die analysierten Fälle zeigten, daß bei sich erniedrigenden Temperaturen die Eisdecke früher bei kleineren Abflüssen und später bei größeren Abflüssen entsteht.

Wegen der geringen Anzahl von Fällen konnten nicht mehrere Kurven dargestellt werden, die verschiedene Abflüsse charakterisieren. Es kann aber gesagt werden, daß z.B. für Tulcea die minimale Grenzkurve (die die minimale Tagesanzahl begrenzt, in der die Eisdecke entsteht) Abflüssen entspricht, die kleiner sind als 1 300 - 1 400 m<sup>3</sup>/s, während die maximale Grenzkurve Abflüssen entspricht, die größer sind als 2 100 - 2 200 m<sup>3</sup>/s.

Die Rolle des Abflusses bei der früheren oder späteren Entstehung der Eisdecke geht noch klarer aus dem Vergleich der graphischen Beziehung  $N = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  für die Stationen Tulcea und Cernavodă mit denen der Station Giurgiu hervor.

Man stellt fest, daß bei annähernd gleichen Lufttemperaturen die Eisdecke bei Giurgiu viel später entsteht; ein Grund dafür ist auch der größere Abfluß.

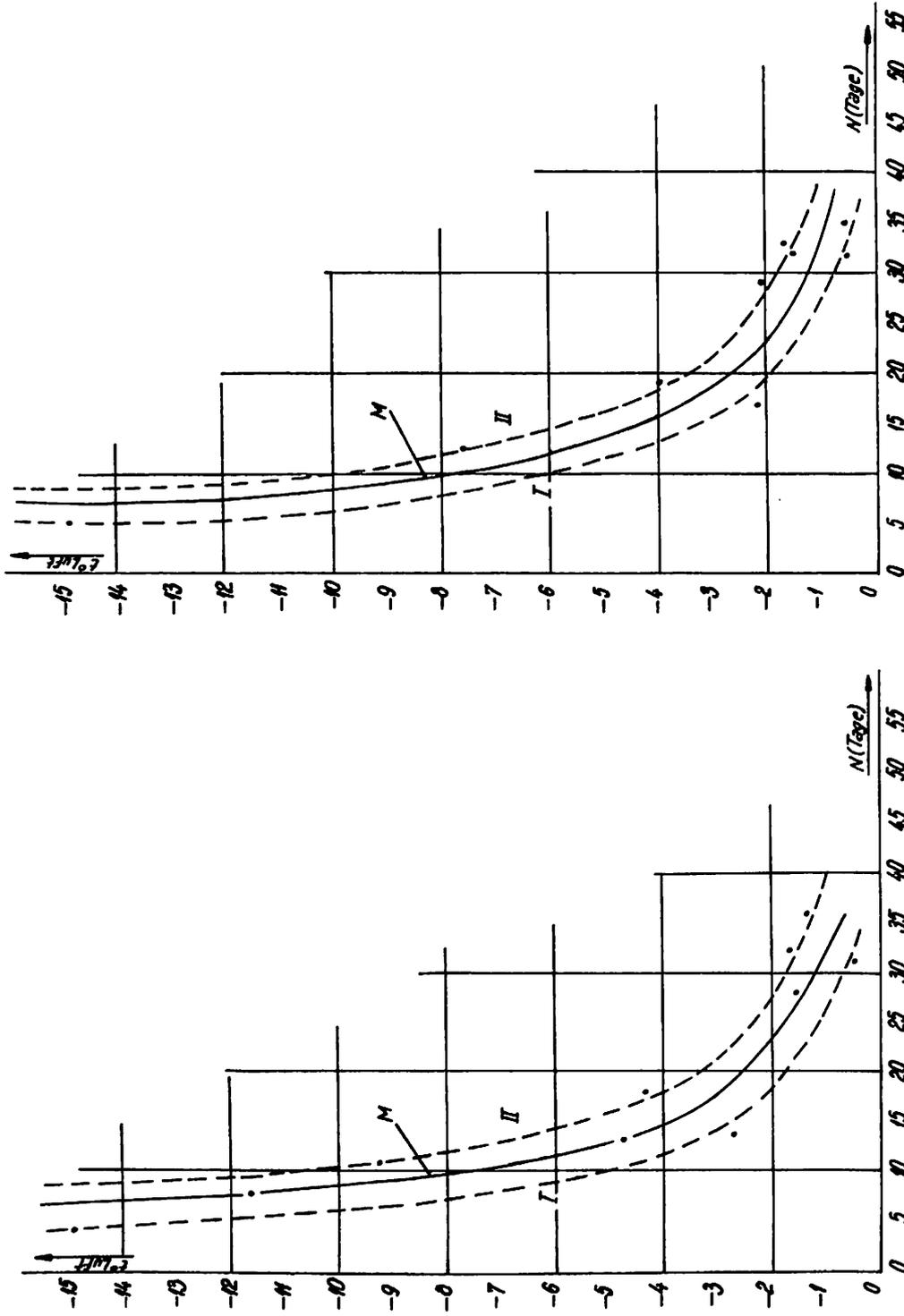


Abb. 2

Beziehung  $N = f(T_{Luft}, Q)$  bei Tolcea für die Abkühlungsperioden des Wassers von 3,0°C und 2,3°C auf 0°C.

- M - Mittelkurve
- I - untere Grenzkurve (minimale)
- II - obere Grenzkurve (maximale)

Aus dem bisher Gesagten geht der enge Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur beim Abkühlungsvorgang und dem Zeitpunkt der Entstehung der Eisdecke hervor.

Für die Vorhersage der Entstehung der Eisdecke wurde es als nützlich erachtet, den Wert des täglichen Abnahmegradients der Wassertemperatur (Grad/Tag) für verschiedene Werte der Lufttemperatur und verschiedene Abkühlungsperioden des Wassers zu berechnen.

Diese Gradienten wurden mit Hilfe der Beziehungen  $N = f(\bar{t}_{\text{Luft}}, \bar{Q})$  bestimmt.

Mit Hilfe der mittleren Kurven dieser Beziehungen wurden die täglichen mittleren Abnahmegradients der Wassertemperatur ( $\lambda_{\bar{t}}$ ) für die verschiedenen Lufttemperaturen berechnet, während die minimale Grenzkurve dafür verwendet wurde, die Höchstgradienten  $\lambda_T$  ebenfalls für verschiedene Lufttemperaturen zu bestimmen.

Der Abnahmegradius der Wassertemperatur wird als das Verhältnis zwischen der Wassertemperatur am Zeitpunkt der Vorhersage und der Anzahl der Tage vom Auftreten dieser Temperatur bis zum Erreichen der Temperatur von  $0^{\circ}\text{C}$  bezeichnet.

Für die Abkühlungsperiode des Wassers von  $3^{\circ}\text{C}$  auf  $0^{\circ}\text{C}$  bei der hydrometrischen Station Tulcea ist der mittlere Abnahmegradius der Wassertemperatur ( $\lambda_{\bar{t}}$ ) das Verhältnis zwischen dem Wert  $3^{\circ}$  und der Anzahl der Tage vom Auftreten dieses Wertes bis zu  $0^{\circ}\text{C}$ , so wie es aus der mittleren Kurve der Beziehung  $N = f(\bar{t}_{\text{Luft}}, \bar{Q})$  hervorgeht.

Konkret heißt dieses, daß die auf der Kurve abgelesene Tagesanzahl 7 beträgt bei einer mittleren Lufttemperatur von  $-13^{\circ}\text{C}$ , und 10 Tage bei einer mittleren Lufttemperatur von nur  $-8^{\circ}\text{C}$ . Der mittlere Tagesgradient ist im ersten Fall  $0,43$  Grad/Tag ( $\lambda_{\bar{t}} = 3/7$ ) und  $0,30$  Grad/Tag ( $\lambda_{\bar{t}} = 3/10$ ) im zweiten Fall.

Aus derselben Beziehung geht hervor, daß der Wert des Abnahmegradients der Wassertemperatur größer ist, wenn die Wassertemperatur zum Zeitpunkt der Vorhersage auf die minimale Grenzkurve bezogen wird.

Im Falle einer mittleren Lufttemperatur von  $-13^{\circ}\text{C}$  beträgt die Anzahl der Tage vom Zeitpunkt des Auftretens der Wassertemperatur von  $3^{\circ}\text{C}$  bis  $0^{\circ}\text{C}$  nur 5 Tage. Der Abnahmegradius wird seinen Höchst erreichen:  $0,60$  ( $\lambda_T = 3/5$ ).

Bei allen drei hydrometrischen Stationen wurden aufgrund der Beziehungen  $N = f(\bar{t}_{\text{Luft}}, \bar{Q})$  sowohl die mittleren Abnahmegradients der Wassertemperatur ( $\lambda_{\bar{t}}$ ) als auch die maximalen Abnahmegradients ( $\lambda_T$ ) berechnet.

Diese Gradienten wurden bei verschiedenen Lufttemperaturen für verschiedene Abkühlungsperioden des Wassers bestimmt; sie sind in Tabelle 1 enthalten.

Die Analyse dieser Gradienten ergibt als eine Besonderheit die Tatsache, daß sich die Werte dieser Gradienten bei Tulcea und Cernavodă für verschiedene Abkühlungsperioden, von  $3^{\circ}\text{C}$  bis  $0^{\circ}$  (und von  $2^{\circ}\text{C}$  bis  $0^{\circ}\text{C}$ ) ziemlich nähern, wenn die Lufttemperatur zu diesem Zeitpunkt gleich ist.

Die mittleren Werte der Gradienten wurden bestimmt und sind ebenfalls in Tabelle 1 enthalten.

Die mittleren Werte der Gradienten, die aus den mittleren Kurven erhalten wurden, sind mit  $\lambda_{\bar{t}_0}$ , diejenigen aber, die aus der unteren (minimalen) Grenzkurve erhalten wurden, mit  $\lambda_{T_0}$  bezeichnet.

Bei der Station Giurgiu erhielten wir jedoch keine ähnlichen Werte für die verschiedenen Abkühlungsperioden des Wassers.

So wie aus Tabelle 1 hervorgeht, nimmt der Gradient bei Annäherung an den Gefrierpunkt des Wassers ab. Aus diesem Grund wurden die mittleren Werte des Gradienten für alle Perioden nicht mehr bestimmt.

Bei allen hydrometrischen Stationen für die die Abnahmegradienten der Wassertemperatur bestimmt wurden, stellt man ihre kleinen Werte fest, mit Ausnahme Giurgiu als ein direktes Ergebnis der größeren Abflüsse.

Für Lufttemperaturen von  $-8^{\circ}$  bis  $-9^{\circ}\text{C}$  z.B. schwankt der mittlere Abnahmegradient der Wassertemperatur bei Tulcea und Cernavodă zwischen  $0,20 - 0,25$  Grad/Tag; bei Giurgiu zwischen  $0,07$  und  $0,18$  Grad/Tag. Die Höchstwerte des Abnahmegradienten der Wassertemperatur schwanken bei Tulcea und Cernavodă - bei gleicher Lufttemperatur - zwischen  $0,25 - 0,37$  Grad/Tag; bei Giurgiu zwischen  $0,09 - 0,21$  Grad/Tag. Dieser langsame Abkühlungsprozeß des Wassers ist bei großen Strömen charakteristisch.

#### 4. Vorhersagemethoden der Eisdecke

Mit Hilfe der Mittelwerte der Abnahmegradienten für alle Abkühlungsperioden des Wassers ( $\lambda_{\bar{t}_0}$  und  $\lambda_{T_0}$ ) und der verschiedenen Lufttemperaturen, wurden Beziehungen vom Typ  $\lambda_{\bar{t}_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  und  $\lambda_{T_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  erhalten, die in Abb. 3 dargestellt sind (Stationen Tulcea und Cernavodă).

Diese Beziehungen können für die Vorhersage des Entstehens der Eisdecke verwendet werden.

Zu diesem Zweck muß man die Vorhersage der Lufttemperatur für die Zeitabschnitte kennen, die dem Messen der Wassertemperatur von  $3,5^{\circ}\text{C}$ ;  $3,0^{\circ}\text{C}$  und  $2,0^{\circ}\text{C}$  folgen, Zeitpunkte, bei denen man die Vorhersage bekannt gibt.

Nachdem man auch den wahrscheinlichen Gang der Abflüsse kennt, legt man fest, abhängig von deren Wert, ob die Berechnung der Abnahmegradienten aufgrund der Beziehungen  $\lambda_{\bar{t}_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  oder  $\lambda_{T_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  erfolgt.

Erwartet man Abflüsse aus der Abkühlungsperiode, die sich dem Mittelwert aus dem Winter nähern, dann wird man die Abnahmegradienten mit Hilfe der Beziehung  $\lambda_{\bar{t}_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  bestimmen. Bei viel kleineren Abflüssen jedoch, werden die Gradienten mit der Beziehung  $\lambda_{T_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  bestimmt.

Als Beispiel sei folgender Fall angeführt: Nehmen wir an, daß bei Tulcea - an einem gewissen Datum im Winter - eine Wassertemperatur von  $3^{\circ}\text{C}$  gemessen wird. Nun soll die Entstehung der Eisdecke vorhergesagt werden. Man nimmt außerdem an, daß der Gang der mittleren täglichen Lufttemperatur für die nächsten 10-11 Tage bekannt ist und ca.  $-10^{\circ}$  bis  $-12^{\circ}\text{C}$  beträgt und daß sich der Gang der Abflüsse dem normalen Wert stark nähert.

In diesem Fall benutzt man die Beziehung  $\lambda_{\bar{t}_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$ , und laut Abb. 3 beträgt der mittlere tägliche Abnahmegradient der Wassertemperatur  $0,3$  Grad/Tag. Bei diesem Wert des Gradienten wird die Wassertemperatur in einem Intervall von 10 Tagen von  $3^{\circ}$  auf  $0^{\circ}$  sinken, ein Zeitpunkt, zu dem die Entstehung der Eisdecke höchstwahrscheinlich ist.

Es sei allerdings bemerkt, daß unabhängig von den vorhergesagten Abflüssen auch die Höchstwerte (maximalen) der Abnahmegradienten der Wassertemperatur mit Hilfe der Beziehung  $\lambda_{T_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  berechnet werden sollten, damit man den frühesten Zeitpunkt des Entstehens der Eisdecke bestimmen kann.

Aus oben erwähnten Gründen konnten für die hydrometrische Station Giurgiu die Beziehung  $\lambda_{\bar{t}_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  und  $\lambda_{T_0} = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  nicht bestimmt werden. Für diese Station wurden die Beziehungen  $\lambda_{\bar{t}} = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  und  $\lambda_T = f(\bar{t}_{\text{Luft}})$  bestimmt und zwar für jede Abkühlungsperiode ab  $3,5^{\circ}\text{C}$ ;  $3,0^{\circ}\text{C}$ ;  $2,5^{\circ}\text{C}$ ;  $2,0^{\circ}\text{C}$ ;  $1,5^{\circ}\text{C}$ ;  $1,0^{\circ}\text{C}$  bis zum Entstehen der Eisdecke (Abb. 4).

Die Vorhersagemethode der Eisdecke ist im Prinzip die gleiche, mit dem Unterschied, daß der Abnahmegradient der Wassertemperatur aufgrund der charakteristischen Beziehungen für jede Abkühlungsperiode bestimmt wird.

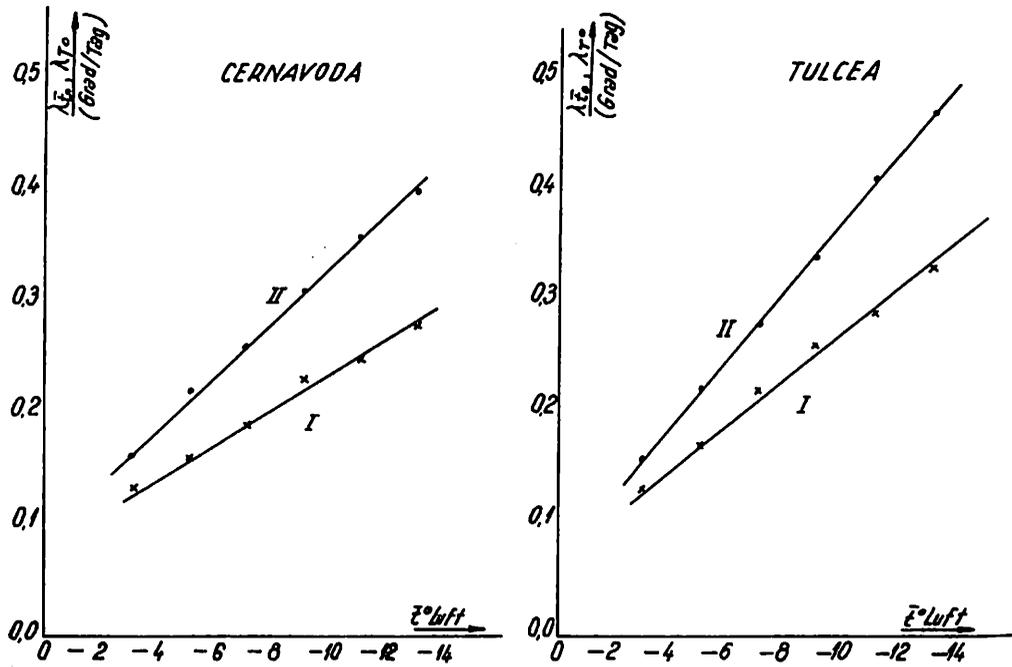


Abb. 3.

Beziehungen: I  $\lambda_{\bar{z}} = f(\bar{e}^{\circ}Luft)$  und II  $\lambda_{\tau} = f(\bar{e}^{\circ}Luft)$  für die hydrometrischen Stationen Tulcea und Cernavoda.

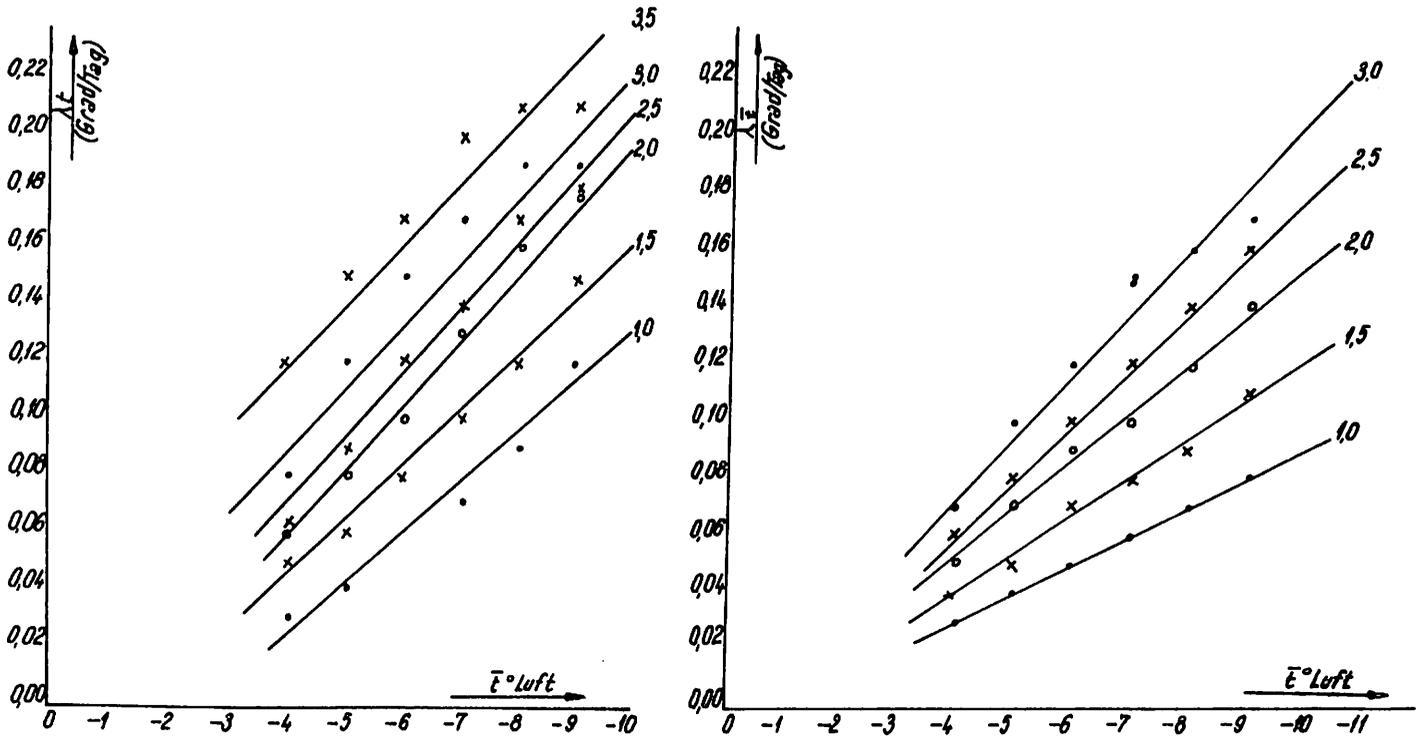


Abb. 4

Die Beziehungen  $\lambda_{\bar{z}} = f(\bar{e}^{\circ}Luft)$  und  $\lambda_{\tau} = f(\bar{e}^{\circ}Luft)$  für die hydrometrische Station Giurgiu.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Vorhersage der Entstehung der Eisdecke von der meteorologischen und hydrologischen Vorhersage abhängig ist. Bei exakten meteorologischen und hydrologischen Vorhersagen beträgt die maximale Abweichung nicht mehr als 20 - 25%.

Die Werte der Abnahmegradiënten der Wassertemperatur bei den hydrometrischen Stationen Tulcea (a), Cernavodă (b) und Giurgiu (c). Tabelle 1

	$t_{Luft}$	Die Werte $\lambda_T$ nach der mittleren Kurve bestimmt, für die Abkühlungsperioden, die mit der Wassertemperatur beginnen:							$\lambda_{T_0}$	$t_{Luft}$	Die Werte $\lambda_T$ nach der Grenzkurve bestimmt, für die Abkühlungsperioden, die mit der Wassertemperatur beginnen:							$\lambda_{T_0}$
		$t_{Wasser}$	1,0°	1,5°	2,0°	2,5°	3,0°	3,5°			1,0°	1,5°	2,0°	2,5°	3,0°	3,5°		
a.	-13	0,25	0,33	0,33	0,36	0,40	0,31	0,33	-13	0,45	0,50	0,44	0,50	0,54	0,40	0,47		
	-11	0,22	0,30	0,28	0,31	0,36	0,29	0,29	-11	0,40	0,43	0,37	0,42	0,45	0,39	0,41		
	-9	0,20	0,26	0,23	0,23	0,22	0,27	0,26	-9	0,33	0,36	0,30	0,32	0,39	0,35	0,34		
	-7	0,16	0,21	0,19	0,23	0,27	0,25	0,22	-7	0,23	0,27	0,24	0,28	0,32	0,32	0,28		
	-5	0,12	0,16	0,16	0,19	0,21	0,21	0,17	-5	0,18	0,19	0,20	0,23	0,25	0,26	0,22		
	-3	0,08	0,10	0,11	0,14	0,16	0,17	0,13	-3	0,11	0,12	0,14	0,17	0,19	0,20	0,16		
b.	-13	0,25	0,33	0,33	0,36	0,40	0,31	0,33	-13	0,45	0,50	0,44	0,50	0,54	0,40	0,47		
	-11	0,22	0,30	0,28	0,31	0,36	0,29	0,29	-11	0,40	0,43	0,37	0,42	0,45	0,39	0,41		
	-9	0,20	0,26	0,23	0,23	0,22	0,27	0,26	-9	0,33	0,36	0,30	0,32	0,39	0,35	0,34		
	-7	0,16	0,21	0,19	0,23	0,27	0,25	0,22	-7	0,23	0,27	0,24	0,28	0,32	0,32	0,28		
	-5	0,12	0,16	0,16	0,19	0,21	0,21	0,17	-5	0,18	0,19	0,20	0,23	0,25	0,26	0,22		
	-3	0,08	0,10	0,11	0,14	0,16	0,17	0,13	-3	0,11	0,12	0,14	0,17	0,19	0,20	0,16		
c.	-9	0,08	0,11	0,14	0,16	0,17	0,18	-	-9	0,12	0,15	0,18	0,18	0,19	0,21	-		
	-8	0,07	0,09	0,12	0,14	0,16	0,17	-	-8	0,09	0,12	0,16	0,17	0,19	0,21	-		
	-7	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,17	-	-7	0,07	0,10	0,13	0,14	0,17	0,20	-		
	-6	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,15	-	-6	0,06	0,08	0,10	0,12	0,15	0,17	-		
	-5	0,04	0,05	0,07	0,08	0,10	0,14	-	-5	0,04	0,05	0,08	0,09	0,12	0,15	-		
	-4	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,12	-	-4	0,03	0,05	0,06	0,06	0,08	0,12	-		

↑  
 $\lambda_{T_0}$

LANGFRISTIGE VORHERSAGE DER EISVERHÄLTNISSE DER DONAU

V. Dumitrescu

ПРОГНОЗ БОЛЬШОЙ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТИ ЗАМЕРЗАНИЯ И ВСКРЫТИЯ В РУМИНСКОМСЕКТОРЕ ДУНАЯ

В. Думитреску

Zusammenfassung:

Theoretische Grundlage des entwickelten Vorhersageverfahrens bildet die Abhängigkeit hydrologischer Erscheinungen einer gegebenen Zeitperiode von den makrosynoptischen Verfahren einer vorangehenden Zeitdauer. Die gleiche Abhängigkeit herrscht auch zwischen den makrosynoptischen Verfahren hintereinanderfolgender Zeitabschnitte. Einzelne makrosynoptische Verfahren, die durch Luftzirkulationsarten gekennzeichnet sind, bestimmen die meteorologischen Voraussetzungen, die ihrerseits die entscheidenden Faktoren der Eiserscheinungen der Vorhersagefrist veranschaulichen.

Unter den angedeuteten Voraussetzungen besteht die mit erweiterter Vorhersagefrist versehene Prognose der Bildung und des Schwundes von Eis in dem Auslegen der Bildungsangaben dieser Erscheinungen und den atmosphärischen Zirkulationscharakteristiken der vorangehenden Zeitperiode.

Die berücksichtigten Luftcharakteristiken sind: die atmosphärische Zirkulationsart im Donaubecken und die Lufttemperatur an der untersuchten hydrometrischen Station.

Die vorherrschenden atmosphärischen Zirkulationsarten innerhalb des Donaubeckens sind: die westliche Type (V), die südliche Type (S) und die östliche Type (E).

Die Vorhersagebeziehungen sind in einer graphischen Form veranschaulicht und wurden aufgrund von Korrelationen der Art

$$T = f(t^0, E, V, S)$$

ausgelegt, worin:

$T$  = Abweichung des Datums der Eisentstehung in Bezug auf das gewöhnliche Datum (in Tagen)

$t^0$  = mittlere Lufttemperatur aus vorangehendem berücksichtigtem Zeitabschnitt

$E, V, S$  = Frequenz atmosphärischer Zirkulationstypen, aus dem vorangehenden berücksichtigtem Zeitabschnitt, ausgedrückt in Tagen.

Резюме:

В работе представлен метод прогноза большой заблаговременности даты образования ледостава и даты вскрытия рек.

Основными факторами, используемыми при определении реляций прогноза, были: тип атмосферной циркуляции, преобладающей в бассейне Дуная и средняя месячная температура воздуха на гидрометрических станциях, в момент, предшествующий составлению прогноза.

Уравнение прогноза имеет следующую форму:

где  $T$  – отклонение в днях даты возникновения явления по отношению к обычной дате

$A$  – повторяемость в днях типа атмосферной циркуляции за предидущий период

– средняя температура воздуха за тот же период

## 1. Allgemeines

Die Vorhersage der Eiserscheinungen ist von großer Bedeutung für die Flußschifffahrt. Rechtzeitig durchgegebene Hinweise über den Gang der Eiserscheinungen ermöglichen das Ergreifen operativer Maßnahmen, um einen reibungslosen Verkehr auf einem Gewässer im Winter zu gewährleisten.

Im rumänischen Sektor der Donau treten die Eiserscheinungen (Eisschollen, Eisdecke) mit großer Häufigkeit auf. Dies macht das Studium von Vorhersagemethoden dieser Erscheinungen unter den klimatologischen Gegebenheiten unseres Landes erforderlich.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit der Vorhersage der Eisdeckenbildung und des Eisauflaufs. Dies sind zwei wichtige Parameter des hydrologischen Regimes der Donau, die die Schifffahrt auf diesem Strom beeinflussen.

Der praktische Nutzen der Vorhersagen wächst mit ihrer Vorausnahmezeit (vorhergehender Beobachtungszeitraum, auf dem die Vorhersage aufgebaut wird - Red. - ). In diesem Sinne verfolgte die Forschungsarbeit die Festlegung einer möglichst langen Vorausnahmezeit, da die Eiserscheinungen im rumänischen Donausektor spezifische Merkmale aufweisen.

Man ging von der Annahme aus, daß die meteorologischen Faktoren die entscheidende Rolle bei den zu untersuchenden Erscheinungen spielen.

Die wichtigsten Etappen der Vorhersage wären demnach:

- die Vorhersage der synoptischen Prozesse
- die Vorhersage der Wetterbedingungen
- die Vorhersage der Eiserscheinungen.

Die ersten zwei Schritte führten vorläufig noch zu keiner befriedigenden Lösung bezüglich der quantitativen Bestimmung der für die hydrologische Vorhersage notwendigen Parameter.

Die auf Weltebene, auf dem Gebiete der Synoptik durchgeführten Forschungen bahnten der hydrologischen Vorhersage mit großer Vorausnahmezeit einen neuen Weg. Es soll eine direkte Korrelation der hydrologischen Parameter mit den Bedingungen des atmosphärischen Kreislaufs einer vorausgegangenen Periode durchgeführt werden. Die Methode fußt auf einem Grundsatz der Makrosynoptik, den B.P. Muliganovski folgendermaßen definierte: "Jede extrapolierte Erscheinung (Phänomen) muß bis zu ihrem Auftreten während einer längeren Zeitspanne vorbereitet werden, sie erreicht ihren Höhepunkt und klingt dann allmählich ab."

Die Praxis beweist, daß die Anomalien meteorologischer Elemente über ausgedehnten Gebieten und die meteorologischen Bedingungen, die die hydrologischen Phänomene beeinflussen, ein Ergebnis der makrosynoptischen Prozesse sind, deren Ablauf während mehrerer vorausgegangener Jahreszeiten verfolgt werden kann.

Die hier behandelte Vorhersagemethode verfolgt die Aufstellung empirischer Beziehungen zwischen dem Zeitpunkt des Entstehens der Eisdecke und des Eisauflaufs sowie den vorausgegangenen hydrometeorologischen Bedingungen.

Folgende hydrometrische Stationen werden als Beispiele angeführt: Călăraşi, Brăila und Tulcea.

## 2. Kurze Charakterisierung der Eiserscheinungen auf der Donau

Die Analyse der entlang des rumänischen Sektors existierenden Daten über Eiserscheinungen beweist, daß ihr Auftreten, die Häufigkeit und ihre Dauer von Baziaş bis zur Mündung zunehmen.

Aus der Datenreihe für die Periode 1927-1974 gehen folgende Häufigkeiten hervor:

- 74 % im Abschnitt Baziaş-Corabia
- 77 % im Abschnitt Turnu Măgurele-Cernavodă
- 82 % in den übrigen Abschnitten.

Die Eisdecke entsteht in 70-80% der Fälle im Abschnitt Călăraşi-Tulcea und in weniger als 35% der Fälle zwischen Baziaş und Corabia. Einen Ausnahmefall stellt der Abschnitt Orşova-Turnu-Severin dar, wo wegen großer Strömungsgeschwindigkeiten nie eine Eisdecke entsteht.

Das frühzeitige Auftreten von Eiserscheinungen auf dem unteren Abschnitt der rumänischen Donau ist durch den Transport kalter Luftmassen in östlicher und süd-östlicher Richtung sowie durch kleinere Fließgeschwindigkeiten des Wassers bedingt.

Die meteorologischen Bedingungen, die die Eiserscheinungen wesentlich beeinflussen, gehen auf atmosphärische Strömungen aus dem W, N, NO zurück, die zu einer Vielfalt von Entstehungsmöglichkeiten und zu verschiedener Dauer der Eiserscheinungen führen.

Die hier ausgewerteten Daten umfassen die Zeitspanne 1929-1974 und beziehen sich auf das Datum des Entstehens und Verschwindens (Eisaufbruch) der Eisdecke. Zur Bestimmung der ausschlaggebenden meteorologischen Faktoren wurden die täglichen Wetterberichte mit den synoptischen Karten und den Lufttemperaturmessungen der gleichen Periode verwendet. Die Datenreihe ist leider zwischen den Jahren 1944-1948 unterbrochen.

Für die vorliegende Forschungsarbeit wurden die meteorologischen Daten aus 37 Jahren und Daten über die Eiserscheinungen aus 20-22 Jahren der erwähnten Stationen verwendet.

### 3. Methodik

Wie bereits erwähnt (Kap. 1), wird die Vorhersage des Entstehens und des Verschwindens der Eisdecke als eine empirische Beziehung zwischen dem Zeitpunkt (Datum) des Entstehens und den Bedingungen der atmosphärischen Zirkulation der vorausgegangenen Periode ausgedrückt.

Die in Betracht gezogenen Bedingungen der atmosphärischen Zirkulation waren:

- der Strömungstyp (Zirkulationstyp) im Donaubecken
- die Lufttemperatur bei der betreffenden hydrometrischen Station.

Die atmosphärischen Zirkulationstypen wurden in Bezug auf ihre Bewegung und der Häufigkeit während der Entstehung der Eisdecke vorausgehenden Zeitspanne untersucht.

In diesem Sinne unterscheidet man drei Typen der atmosphärischen Zirkulation:

- a) der westliche Typ (W), der durch die Verlagerung der Zyklone von W nach O und durch warme Meeresluftmassen gekennzeichnet ist;
- b) der südliche Typ (S) ist charakterisiert durch das Vordringen von Antizyklonen aus Richtung Nord und durch kalte Luftmassen während kalter Winter;
- c) der östliche Typ (O) ist durch das Eindringen ultrapolarer Luft bestimmt.

Für die Bestimmung der bei der Entstehung der Eiserscheinungen ausschlaggebenden Zirkulation wurden die Monatshäufigkeiten (Tagesanzahl) und der langjährige Mittelwert der Monatshäufigkeiten für jeden der drei Zirkulationstypen berechnet (O, W, S).

Vangenheim beweist, daß zwischen den ausschlaggebenden Zirkulationstypen aufeinanderfolgender Monate eine enge Verbindung besteht.

Das Vorhersageverfahren bezweckt also das Aufstellen einer Beziehung, die die Abweichung in Tagen ( $\Delta T$ ) gegenüber dem Normalwert der Zeitpunkte des Auftretens der Eiserscheinungen, abhängig vom ausschlaggebenden Zirkulationstyp (O, W, S) und der mittleren Lufttemperatur der früheren Perioden, ausdrückt.

$$T = f(t^0, O, W, S)$$

Für die Vorhersage der Entstehung der Eisdecke wurden die Charakteristiken der Zirkulationstypen der Monate Oktober und November bestimmt.

Für die Vorhersage des Eisaufbruchs wurden die notwendigen Daten nur für den Februar bestimmt.

#### 4. Aufstellen der Prognosebeziehungen - Analyse der Ergebnisse

Die Prognosebeziehungen des Entstehens der Eisdecke und des Eisaufbruchs für die Meßstellen Brăila und Tulcea wurden in graphischer Form dargestellt (Abb. 1 und Abb. 2). Die Abzisse stellt die  $\Delta T$  Werte dar (Abweichungen in Tagen gegenüber dem Normalwert). Die Ordinate stellt die Mittelwerte der Lufttemperaturen in den Monaten Oktober und November dar (Entstehen der Eisdecke) und Februar (Eisaufbruch). Die im Achsenfeld gelegenen Punkte beziehen sich auf die ausschlaggebenden Zirkulationstypen früherer Perioden.

Aus der Analyse der graphischen Beziehungen (Abb. 1 bis 4) geht einwandfrei hervor, daß der ausschlaggebende Faktor sowohl für die Entstehung der Eisdecke als auch für den Eisaufbruch die Häufigkeit der östlichen Zirkulationstypen der früheren Perioden ist.

Bei der Vorhersage der Eisdecke treten zwei verschiedene Fälle auf:

- die östliche Zirkulation ist ausschlaggebend ( $O_{X+XI} > S, W$ ) und der Mittelwert der Summe der mittleren monatlichen Lufttemperaturen der Monate Oktober und November ist größer als  $5^0$ . Es ergibt sich eine Abweichung des Zeitpunktes des Entstehens der Eisdecke in einem Intervall von -30 bis +10 Tagen gegenüber dem mittleren langjährigen Datum;
- die Häufigkeit der östlichen Zirkulation ist kleiner als die Summe der Häufigkeiten der westlichen und südlichen Zirkulation; das Mittel der monatlichen Lufttemperatur ist kleiner als  $5^0$ . Für diesen Fall wird als Nummerindex die Häufigkeit der südlichen Zirkulation (S) verwendet, die eine Abweichung des Entstehens der Eisdecke in einem Intervall von -10 bis +30 Tagen gegenüber dem mittleren langjährigen Datum bedingt.

Das Phänomen ist gleichartig auch im Falle der Vorhersage des Eisaufbruchs. Für die bestimmende östliche Zirkulation  $O_{II} > (S+W)_{II}$  und für mittlere monatliche Lufttemperaturen kleiner als  $-1^0$ , schwanken die Abweichungen des Datums des Eisaufbruchs zwischen -40 bis 30 Tagen gegenüber dem mittleren langjährigen Datum.

In Monaten mit einer mittleren Temperatur, die größer ist als  $-1^0$  und einer Häufigkeit der östlichen Zirkulation, die kleiner ist als die Summe der Häufigkeiten der westlichen und südlichen Zirkulation, schwankt die Abweichung des Datums des Eisaufbruchs zwischen -20 und +30 Tagen gegenüber dem mittleren langjährigen Datum.

Die Ausarbeitung der Vorhersage erfolgt am 1. Dezember für die Entstehung der Eisdecke und am 1. März für den Eisaufbruch.

Die Vorausnahmezeit beträgt Minimum 1 Monat.

#### 5. Kritische Wertung der Vorhersagebeziehungen

Die Ergebnisse wurden folgendermaßen kontrolliert: einerseits wurden die Fehler der aus den Diagrammen abgelesenen Prognosen in Betracht gezogen, andererseits wurden die Fehler mit jenen verglichen, die man erhalten hätte, wenn man die Vorhersage aufgrund der mittleren langjährigen Werte aufgestellt hätte.

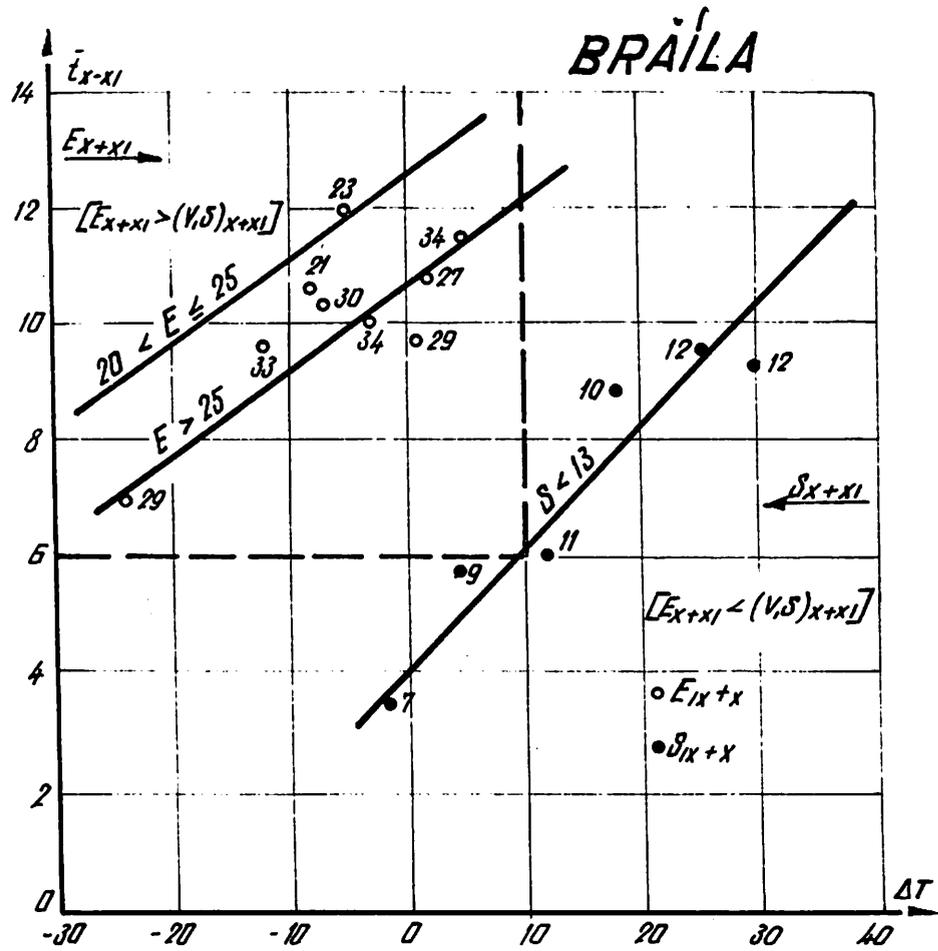


Abb. 1: Vorhersagebeziehung für den Zeitpunkt des Entstehens der Eisdecke bei Brăila

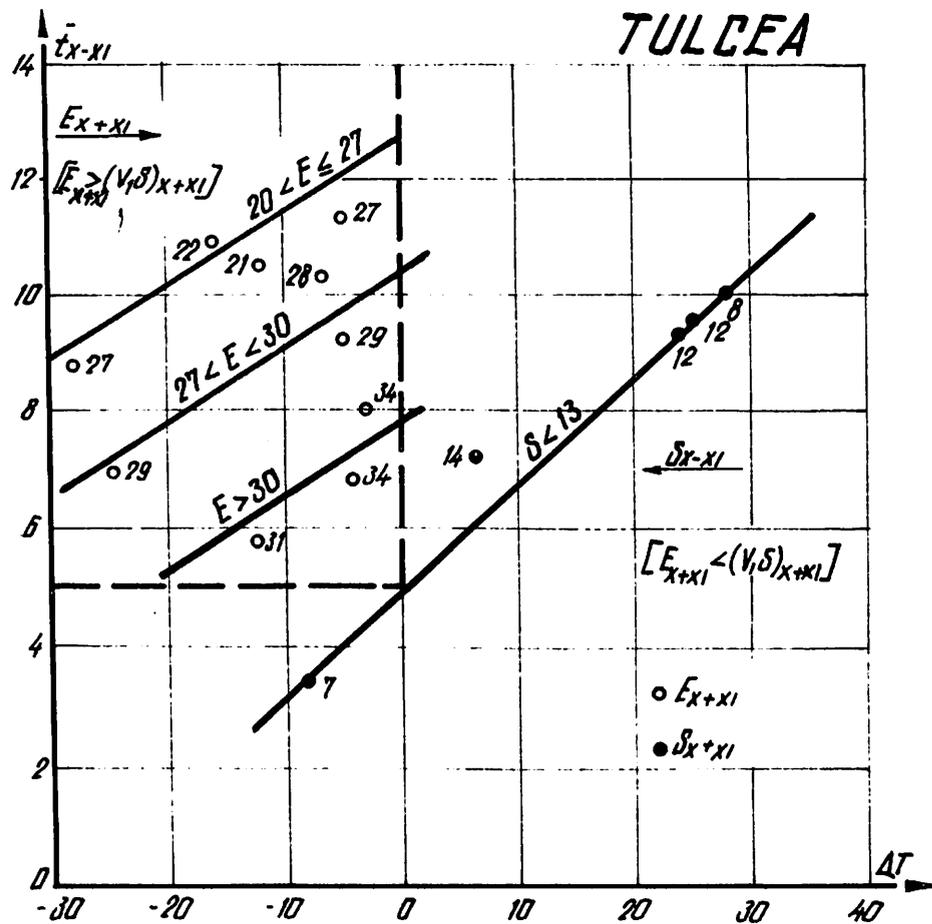


Abb. 2: Vorhersagebeziehung für den Zeitpunkt des Entstehens der Eisdecke bei Tulcea

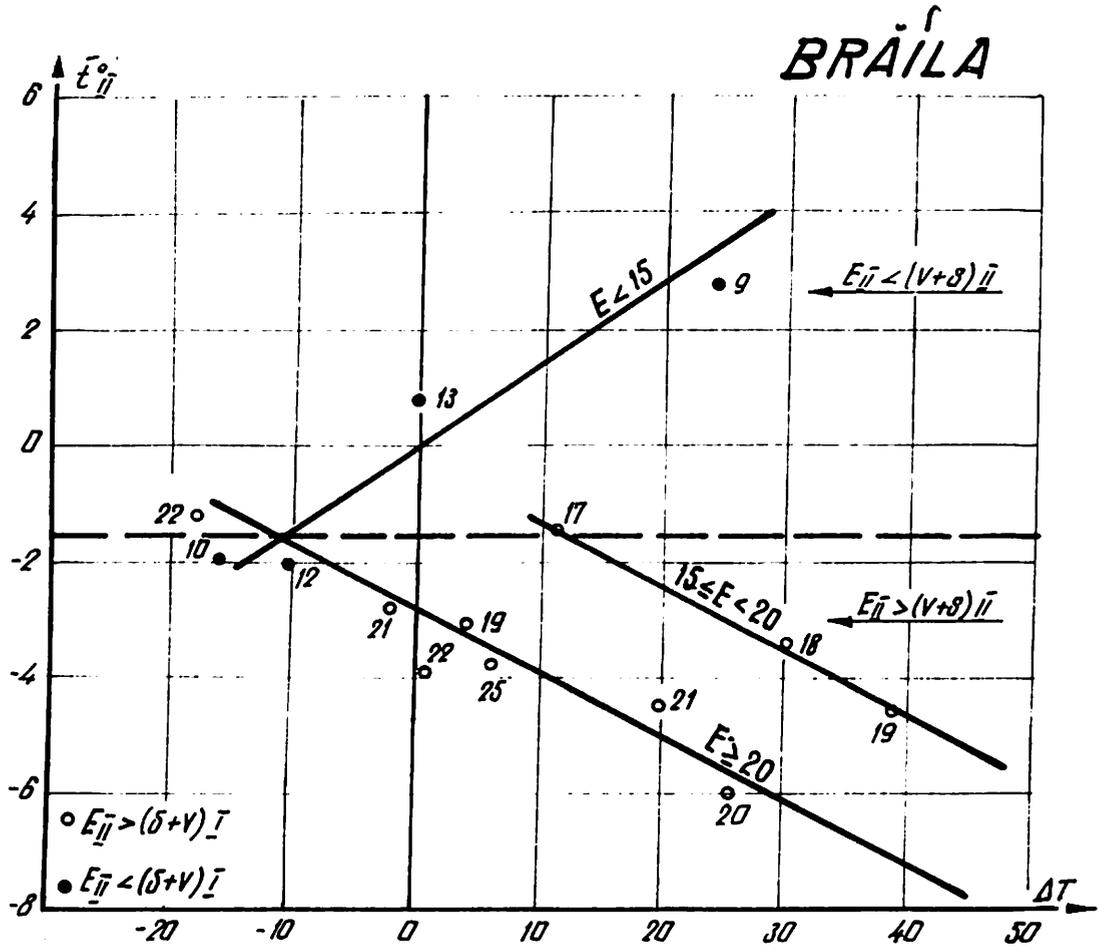


Abb. 3: Vorhersagebeziehung für den Zeitpunkt des Eisaufbruchs bei Brăila

— Fehler aus der Vorhersage  
 - - - Fehler gegenüber dem Normalwert

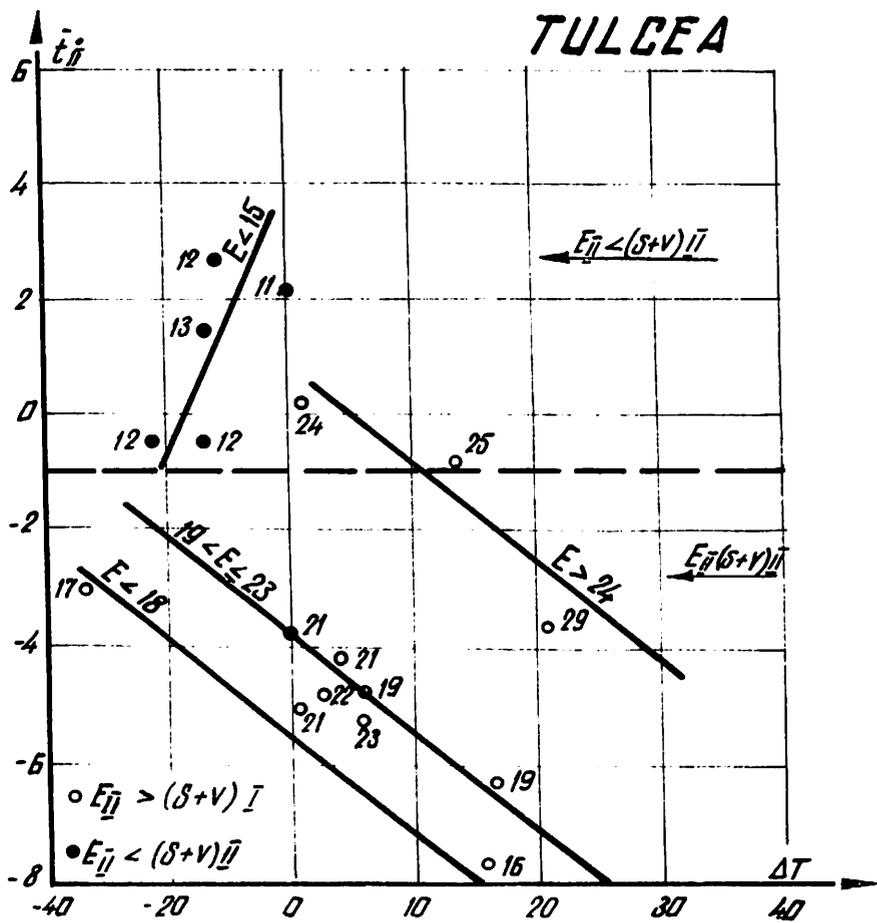


Abb. 4: Vorhersagebeziehung für den Zeitpunkt des Eisaufbruchs bei Tulcea

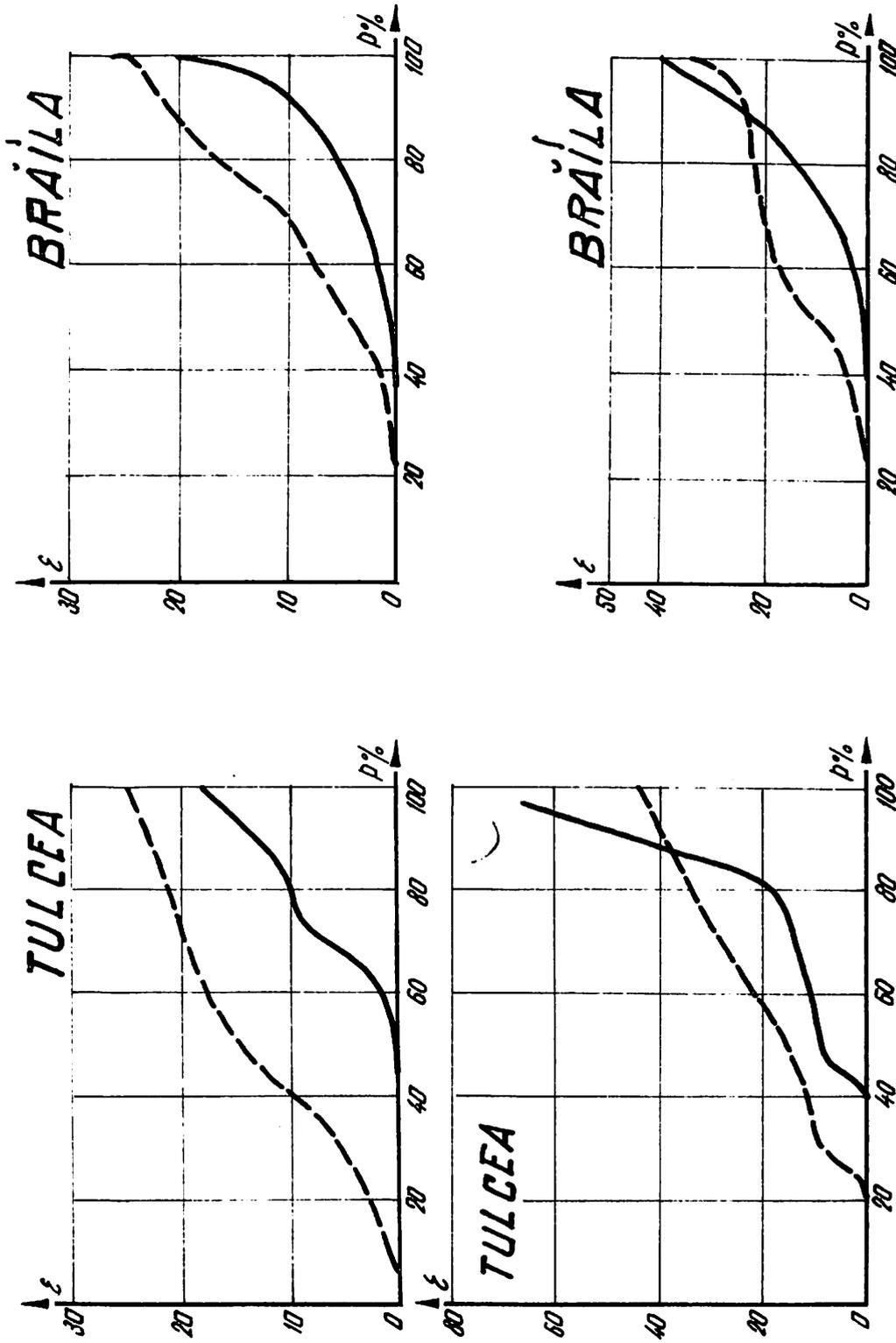


Abb. 5: Dauerlinien der Vorhersagefehler  
 — Fehler aus der Vorhersage  
 - - - Fehler gegenüber dem Normalwert  
 - · - Vorhersage des Entstehens der Eisdecke  
 · · · Vorhersage des Eisauflaufs

Diese Beziehungen sind gültig, wenn die Fehler der Vorhersage weniger als 20% der Amplitude der natürlichen Erscheinungen ausmachen und wenn der Prozentsatz der Vorhersage aufgrund der Beziehungen größer ist als der Prozentsatz der Vorhersage aufgrund der Mittelwerte.

Die Einschätzung der Ergebnisse geschah aufgrund der absoluten Fehler der Prognosen. (Differenz in Tagen zwischen dem vorhergesagten Datum und dem reellen Datum des Phänomens). Die Benutzung des absoluten Fehlers anstelle seines relativen Wertes (bezogen auf die Amplitude des Phänomens) ist der ungünstigste Fall. Es wurde aber dieser Weg gewählt, um möglichst in der Nähe der wahren Gegenbenheiten zu bleiben, für die der absolute Wert der Fehler von Bedeutung ist.

Als natürliche Amplitude des Phänomens bezeichnet man die Anzahl der Tage zwischen dem frühesten und dem spätesten Datum seines Entstehens in der Jahresreihe, die bei der Konstruktion der graphischen Darstellung verwendet wurde.

Die natürliche Amplitude des Entstehens der Eisdecke beträgt ca. 50 Tage, die des Eisaufbruchs 60 Tage - 20% der Amplitude der zulässigen Fehler ist also ca. 10-12 Tage beim Gefrieren und 12-15 Tage beim Abtauen.

Dieser Wert ist mit der Streuung des Phänomens vergleichbar.

Eine Reihe von graphischen Darstellungen enthalten die Ergebnisse der Fehler der Prognosen, die mit Hilfe der Prognosebeziehungen und des mittleren langjährigen Datums aufgestellt wurden (Abb. 5).

Man bemerkt, daß bei allen Meßstellen der Prozentsatz der zulässigen Prognosen größer ist für die mit Hilfe der Prognosebeziehungen aufgestellten Prognosen.

Die Methode bewährt sich vor allem bei Tulcea, wo das Wasser mehrere Male während derselben Jahreszeit gefriert, was den Mittelwert beeinflusst, der wenig repräsentativ ist.

Der Prozentsatz der zulässigen Prognosen mit Fehlern unter 20% der Amplitude bis (10-12 Tagen) schwankt zwischen 35% und 90% und stellt im allgemeinen über 2/3 des Gesamtwertes der Prognosen dar. Für das Auftauen beträgt der Prozentsatz 70 - 85%.

Sehr bedeutsam ist die große Kennziffer des Prozentsatzes der Prognosen mit Fehlern bis zu 5 Tagen, die über 50% der Anzahl der Kontrollprognosen umfaßt.

Da die Vorausnahmezeit der Vorhersagen groß ist, (50 - 70 Tage für das Gefrieren und 30 - 60 Tage für das Abtauen) können die Ergebnisse als zufriedenstellend betrachtet werden.

UBER EISVERHALTNISSE UND WINTERHOCHWASSER DER DONAU IM BEREICH DER GROSSKRAFTWERKE  
KACHLET BIS YBBS-PERSENBEUG (6 DoKW)

O. Kretschmer

ЛЕДОВЫЕ УСЛОВИЯ И ЗИМНИЕ ПАВОДКИ ДУНАЯ В РАЙОНЕ КРУПНЫХ ГИДРОСТАНЦИЙ  
ОТ КАХЛЕТА ДО МЕСТНОСТИ ИБС-ПЕРСЕНБОЙГ (6 ДУН ГЭС)

O. Кречмер

1. Ober die bayerisch-österreichische Donau

Befaßt man sich mit den Eigenschaften der Donau in Bayern und Österreich, so ist die Feststellung von Bedeutung, daß es sich hier um einen Gebirgsfluß handelt. Sie windet sich durch Engtäler und Ebenen mit dem in Österreich großen, mittleren Gefälle von 0,45 % und nimmt rechtsufrig ein halbes Dutzend wasserreiche Zubringer auf, jedenfalls viel bedeutendere als linksufrig. Sie durchteilen das Alpenvorland in rund 100 km langen, meist in Lockergestein eingetieften Gerinnen, aus denen sie in Niederwasserzeiten auch mit anders temperiertem Grundwasser angereichert werden. Seit 1930 kommt der Abwärme aus Siedlungen, Industrien und Wärmekraftwerken eine ansteigende Bedeutung zu. (Abb. 1).

**Kartenskizze des bayerisch-österreichischen Donaaraumes**

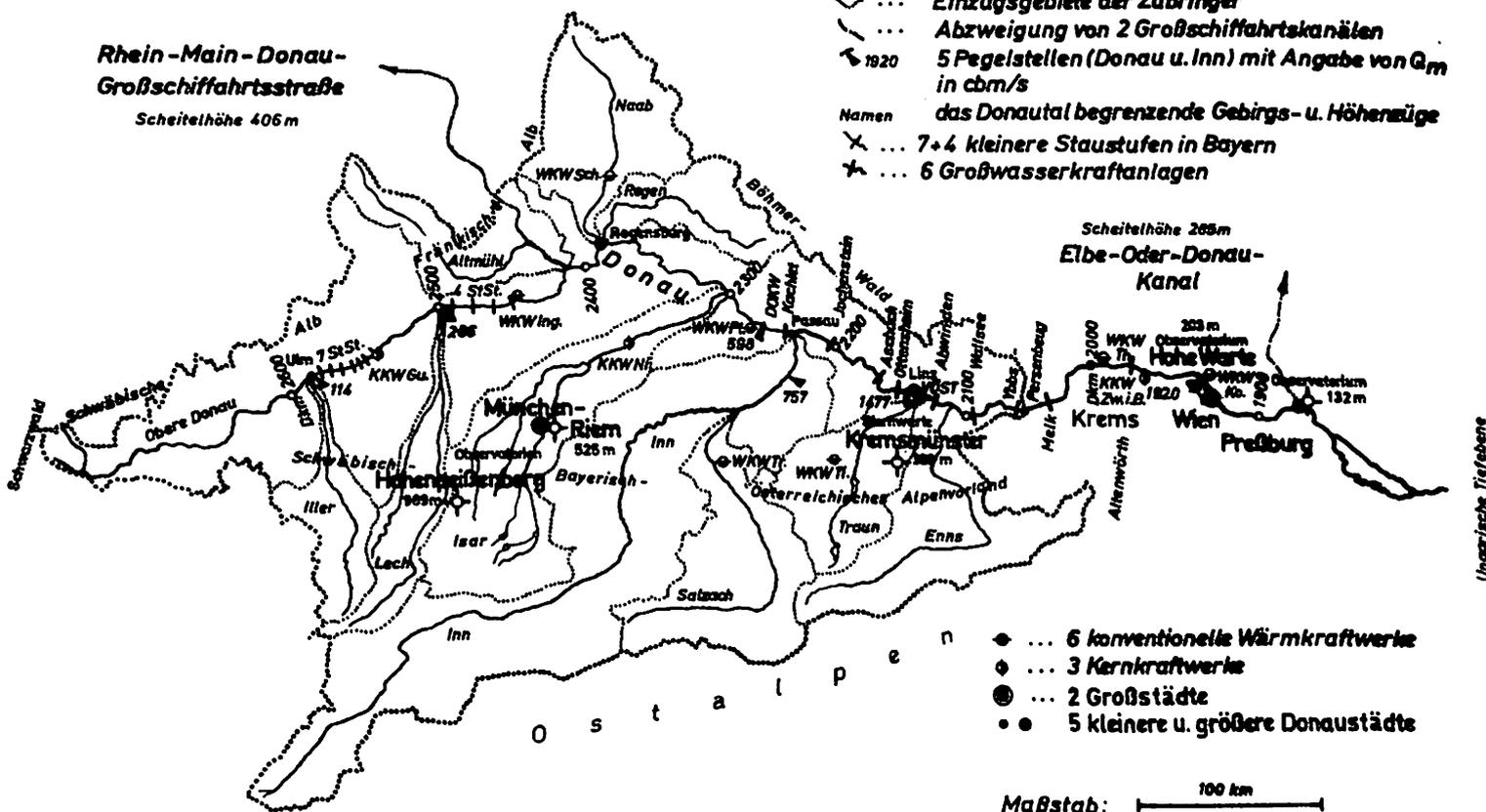
Bewohner des Donautes unter 800m Seehöhe  
geschätzt 10 Millionen

Erklärungen:

- ... 5 meteorologische Observatorien
- ... Lauf der Donau vom Schwarzwald bis Preßburg und ihre bedeutendsten Zubringer
- ... Einzugsgebiet der Donau bei Ybbs 92452,2 km<sup>2</sup>
- ∨ ... Einzugsgebiete der Zubringer
- ∩ ... Abzweigung von 2 Großschiffahrtskanälen
- ↘ 1820 ... 5 Pegelstellen (Donau u. Inn) mit Angabe von G<sub>m</sub> in cbm/s
- Namen ... das Donautal begrenzende Gebirgs- u. Höhenzüge
- ✕ ... 7+4 kleinere Staustufen in Bayern
- ★ ... 6 Großwasserkraftanlagen

**Rhein-Main-Donau-  
Großschiffahrtsstraße**  
Scheitelhöhe 406 m

Scheitelhöhe 285 m  
**Elbe-Oder-Donau-  
Kanal**



- ◆ ... 6 konventionelle Wärmekraftwerke
- ... 3 Kernkraftwerke
- ⊙ ... 2 Großstädte
- ... 5 kleinere u. größere Donaustädte

Maßstab: 100 km

Abb. 1 Kartenskizze des bayerisch-österreichischen Donaaraumes

Die Donau unterscheidet sich also wesentlich von den Flachlandflüssen des übrigen Europa. Ihr großes Gefälle und die reichen Wasserspender ihres Einzugsgebietes geben ihr einen technisch wertvollen Charakter. Die Folgen waren in unserer energiehungrigen Zeit der Ausbau bedeutender Wasserkraftwerke zuerst an den Zubringern und ab 1956 bis zwei Ketten von Donaukraftwerken. Sie geben dem Strom ein neues Gepräge, das hinsichtlich Eis, Winterhochwässer und Wassertemperatur betrachtet werden soll. (Abb. 2).

**Übersichtslängenschnitt der bayerisch-österreichischen Donau mit Kraftwerksverteilung**

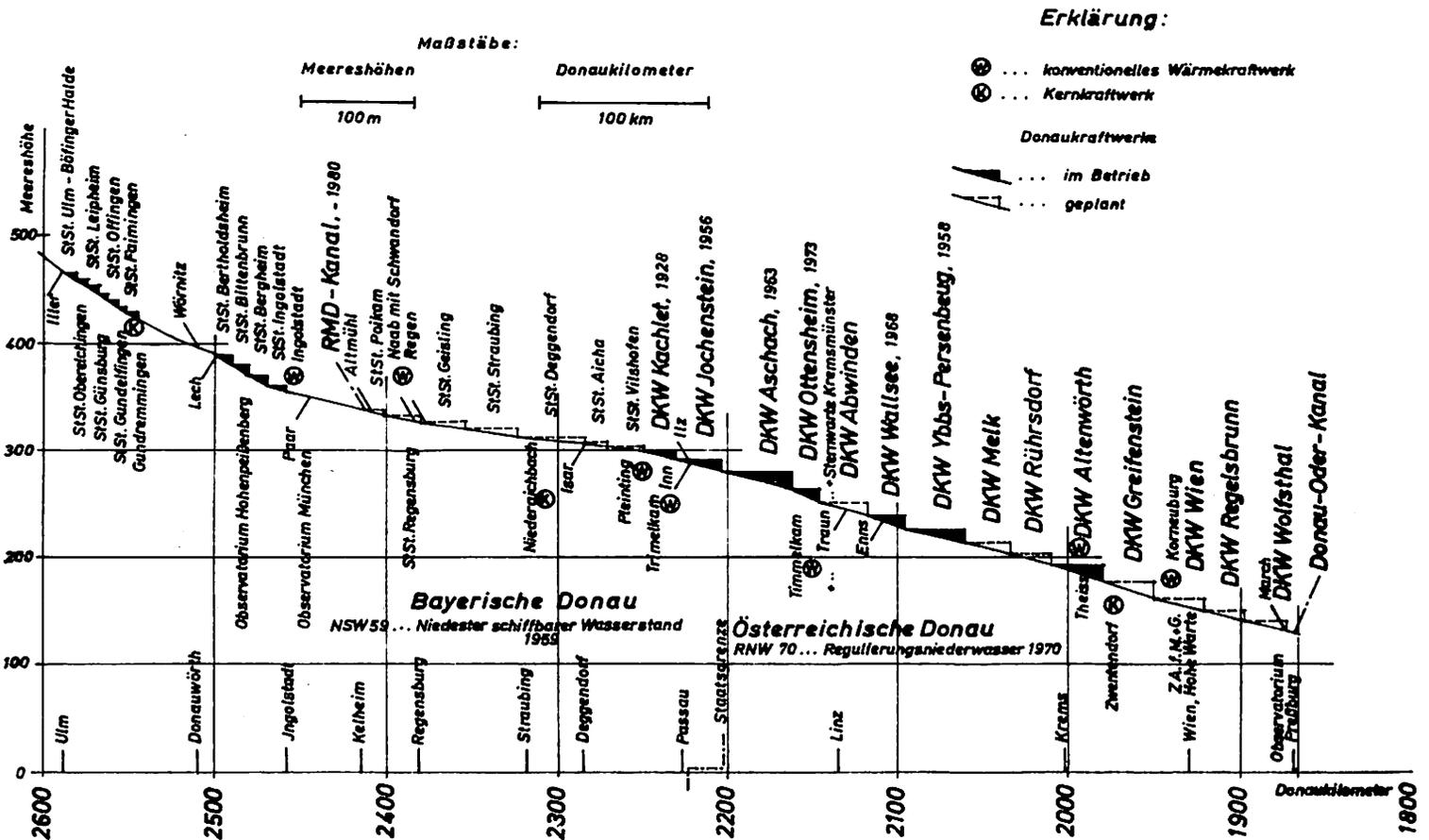


Abb. 2 Übersichtslängenschnitt der bayerisch-österreichischen Donau mit Kraftwerksverteilung

**2. Ober die Winterkälte und die Eisverhältnisse im bayerisch-österreichischen Donautal**

In kalten Wintern bildet sich in den Gewässern Eis, das von der Winterkälte abhängig ist. In der Meteorologie ist ein charakteristisches Maß der Winterkälte eines Ortes die Winterkältesumme (WKS); das ist jener Wert, der sich als Summe aller negativen Tagesmittel der Lufttemperatur eines Winters ergibt. Der Verfasser hat aus 200jährigen Reihen der Lufttemperatur von fünf Observatorien die WKS ermittelt und damit für den hier betrachteten Abschnitt des Donautales festgestellt, daß die Kälte, von West nach Ost dem Relief folgend, abgenommen hat, daß die Winterstruktur einheitlich war und daß es in dieser Epoche nach den WKS vier Klimaschwankungen gegeben hat.

Klimaperioden nach Winterkältsummen der Wetterstation Kremsmünster in den letzten rund 200 Jahren

1)	1785/86 - 1828/29	44 Winter	-277 WKS,	gehäuft obermittelkalt
2)	1829/30 - 1895/96	67 Winter	-319 WKS,	gehäuft kalt (streng)
3)	1896/97 - 1927/28	32 Winter	-195 WKS,	untermittelkalt, nicht streng
4)	1928/29 - 1970/71	43 Winter	-255 WKS,	viel untermittelkalt, aber einige markante strenge Winter

In der jetzigen Periode ist das Verhältnis der strengen Winter zu den wärmeren wie 1 : 7, während es in dem kalten Abschnitt 1 : 3 war. [Zur Meteorologie vgl. (15) und (16)].

Der Verfasser hat zur besseren Beurteilung der Winterkälte die WKS eines Ortes in die Klassen von mild (m) über untermittelkalt (umk), obermittelkalt (omk) bis kalt (streng, k und zwar  $k_5$  bis  $k_1$ ) eingeteilt. Der kälteste Winter ( $k_1$ ) in 200 Jahren war jener von 1829/30. Die Lufttemperatur eines Observatoriums, wenn mehr im Flachland gelegen, sind repräsentativ für rund 80 km im Umkreis. Der Verfasser verwendet so diese Beobachtungen von Kremsmünster für rückblickende Vergleiche (Extrapolationen) zu heutigen Verhältnissen. Sie sind damit repräsentativ von etwa Passau bis Ybbs.

Die Anfangs- und Endkälteperioden eines Winters haben meist keine wesentliche Eisproduktion - es reicht nicht zum Eistreiben - in dem vorher erwähnten Stromabschnitt (6 DoKW). Den eigentlichen Kern des Winters bilden etwa ein bis zwei Hauptkälteperioden, die das Eisgeschehen prägen. Der Verfasser nennt diesen Winterabschnitt den Donau-Eiskernwinter (DEKW) und seine WKS dann DEK-WKS. Mit ihnen und den Eisbeobachtungen der letzten 18 Winter lassen sich die Größe der Eisproduktion, die Beziehungen zwischen Dauer der Eisbedeckung in Stauräumen und den Schifffahrtssperren herstellen. (Tab. 1).

Tab. 1. Über Kennzahlen der Eisverhältnisse der Donau im Grenzraum Bayern - Oberösterreich

Kälteklassen WKS Klasse °C	Eismengenklassen DEK-WKS (Kremsmünster) Zahl Eis- mengen	DEK- WKS Mittel	Begleitende Kennzahlen				
			172 Jahre Wintervert. Zahl	172 Jahre Wintervert. %	18 00) Winter	Schifffahrts- sperren in d	
0	9 eisfrei	—	26	16	78	1959,65,67	—
-172	8 kleine	19	32	19		1958,61,62	8
	7 mittlere	31	43	25		68,72,73	17
-273	6 bedeutende	45	31	18		1957,60,66	
-393	5	61	21	12	69,70,71	31	
	4 große	63	11	6	22	1956	50
über	3 sehr große	68	2	1		1964	51
-393	2 extremste	30	3	2		1963	91
	1	72	2	1		(1830,1880)	?

+) Diese beiden Winter zählen nicht zu den letzten 18

oo) Gemeint ist die Periode 1956-73, in der die österreichischen Donaukraftwerke entstanden

++) m ... mild, umk ... untermittelkalt, omk ... obermittelkalt, k ... kalte Winter

### 3. Die Eisverhältnisse der Donau im bayerisch-österreichischen Stromabschnitt

#### 3.1 Die Zeit vor Errichtung der Donaugroßkraftwerke

Vorausgesetzt wird die Kenntnis der Entstehung von plattigem Oberflächeneis, Schwebeis und Grundeis. Alle drei Arten bilden das Treibeis, wobei die letzten beiden zum schwammigen Anteil gehören.

In Bayern beim Hönigstein (Kachlet) und unterhalb von Preßburg mit Auswirkung auf die österreichische Donau stellte sich oft das Eis schon bei umk Wintern und baute in k Wintern als Eisstoß über mehr als 150 km stromauf vor. (Abb. 3). Von Melk bis Passau gab es wegen der großen Fließgeschwindigkeit nur Teibeis. Eine



wesentliche Besserung der Eisverhältnisse gegenüber der alten, verwilderten Donau trat nach der etwa 80 Jahre dauernden Donauregulierung auf, da der Strom in einem einheitlichen Bett und auch schneller floß. Die neuere Zeit brachte bereits und bringt auch noch bis etwa 1990 wesentlich geänderte Eisverhältnisse durch den Bau der Donaugroßkraftwerke.

### 3.2 Die Verhältnisse nach Errichtung von 5 Donaugroßkraftwerken

Der Strom wurde ab 1956 unterhalb des Kachletwerkes (1928) bei Passau durch Stauwerke in 20 bis 40 km lange Stauräume geteilt, von denen 5 fertiggestellt und der Rest im Bau oder noch geplant sind. (Abb. 1 und 2). Die Stauhöhen betragen 10 bis 16 Meter. Die neuen Wasserspiegellagen verlaufen in flachen Staukurven, die beim Wehr nahezu horizontal und im UW des nächsthöheren Kraftwerkes mit ungefähr gleichem Gefälle wie vor Stau sich ergeben. Die Fließgeschwindigkeiten nehmen bei NW vom Wehr mit 0,15 m/s bis zum UW des nächsthöheren KW auf etwa 1,2 m/s zu und sind damit gegenüber der früheren "freien" Donau grundverschieden.

### 3.3 Die Eisbedeckung der Stauräume

Die Eisbildung in den Stauräumen ist gegenüber vorher etwas verzögert. Ab dem Wehr entsteht eine ebene, glatte Eisdecke, die bei Verschärfung des Frostes und Abnahme der Donautemperatur auf  $0^{\circ}\text{C}$  über Nacht um mehrere Kilometer wächst. Sie ist wenige Zentimeter stark und wird mit der Kälte schnell dicker und länger. Das Eis ist ein schlechter Wärmeleiter und trennt das Wasser vom Einfluß der Atmosphäre. Die Wassertemperatur bleibt in allen Tiefen bei  $0^{\circ}\text{C}$ , ohne Unterkühlung oder Schichtung. Das Fließen ist durchmischend aber langsamer und die Wassertiefe größer. Alles Voraussetzungen, die kaum eine Bildung von Schweb- und keine von Grundeis zulassen. Das sind die Vorteile einer unberührten Eisdecke. Die Eisbekämpfung erfolgt heute nicht mehr mit täglichem Brechen und Triften; es gibt damit keine Wasserverluste mit Energieeinbuße und keine "Eisfabrik". (Abb. 4).

Hat sich die Eisdecke über die Hälfte des Stauraumes aufgebaut - die Übergänge sind fließend -, entwickelt sich bei Geschwindigkeiten von 0,6 bis 0,8 m/s eine schuppige Schollendecke, die im letzten Drittel des Stauraumes zur Schoppung wird. Es kommt zu keinem echten Eisstoß mehr; es fehlt damit auch der Eisstau bis zu 4 m Höhe! Die Abb. 4 stammt aus dem Stauraum Ybbs vom Winter 1962/63. Da stromaufwärts noch kein KW Wallsee war, sondern eine freie Donau von 100 km bestand, hatte im letzten Drittel des Stauraumes (Bild 4/4) das Eis noch Stoßcharakter.

### 3.4 Donaueispläne und Eisschmelzformel

In den letzten 20 Jahren wurden 5 Donaugroßkraftwerke gebaut, und es gab in dieser Zeit 15 Eiskernwinter, deren Eisverhältnisse durch amtliche Eisberichte von den oberen Eisstoßenden in Bayern bis zum KW Ybbs registriert wurden. Um die Eisverhältnisse richtig studieren und auswerten zu können, ist es zweckmäßig, sogenannte Donau-Eispläne zu zeichnen, wie jene beiden von den Wintern 1962/63 und 1963/64 in Abb. 5 vereinfacht dargestellt sind.

Der Abbau des Eises erfolgt bei einem kräftigen Tauwetter von der bayerischen Donau her. Die erste auftretende Wasserwärme wird im Stauraum (StR) Kachlet verbraucht und der StR eisfrei; dann kommt das wärmere Wasser in den StR Jochenstein usw. Im Detail sieht das so aus: Eis schmilzt bei  $0^{\circ}\text{C}$ , wenn pro kg 79,4 Cal herangebracht werden. Die gestaute Donau ist in den StR bei strenger Kälte mit Eis bedeckt. Darunter fließt Wasser mit  $0^{\circ}\text{C}$ . Bei Tauwetter kommt im obersten Stauraum bereits Wasser mit  $0,1^{\circ}\text{C}$  an, und es beginnt die Schmelzung. Das Wasser fließt im Stauraum trotz verminderter Geschwindigkeit turbulent, und es bespült anderes, wenn auch gering warmes Wasser, das Eis. Die in 5 Tagen geschmolzene Eismenge betrug in StR Ybbs nach Ermittlung des Verfassers im Winter 1962/63 rd.  $\sim 2$  Mio cbm Eis. Die Berechnung erfolgte nach Formel Abb. 6. Bei Unstetigkeit durch Mündung eines Zubringers ist abschnittsweise vorzugehen. Um von den sehr großen aufgewendeten Energien eine Vorstellung zu bekommen, sei erwähnt, daß 1 000 cbm/s Donauwasser von  $0,1^{\circ}\text{C}$  Wärme im Tag 100 000 cbm Eis schmelzen. Der letzte bedeutendere Winter war der obermittelkalte von 1969/70. Er ist in Form eines Donau-Eisplanes in etwas vereinfachter Art in Abb. 7 dargestellt. Dieser Winter ist deshalb interessant, weil damals bereits 5 DoKW mit Unterbrechung von rd. 50 km fast als Kette

Die Eisstände im Flußstauraum bei geschlossener Kraftwerkskette  
 Beispiel Stauraum Kufybs - Persenbeug im strengen Winter (K<sub>3</sub>) 1962/63  
 Fließgeschwindigkeiten bei Regulierungeniedrigwasser  $u_{RNW} = 000 \text{ cm/s}$

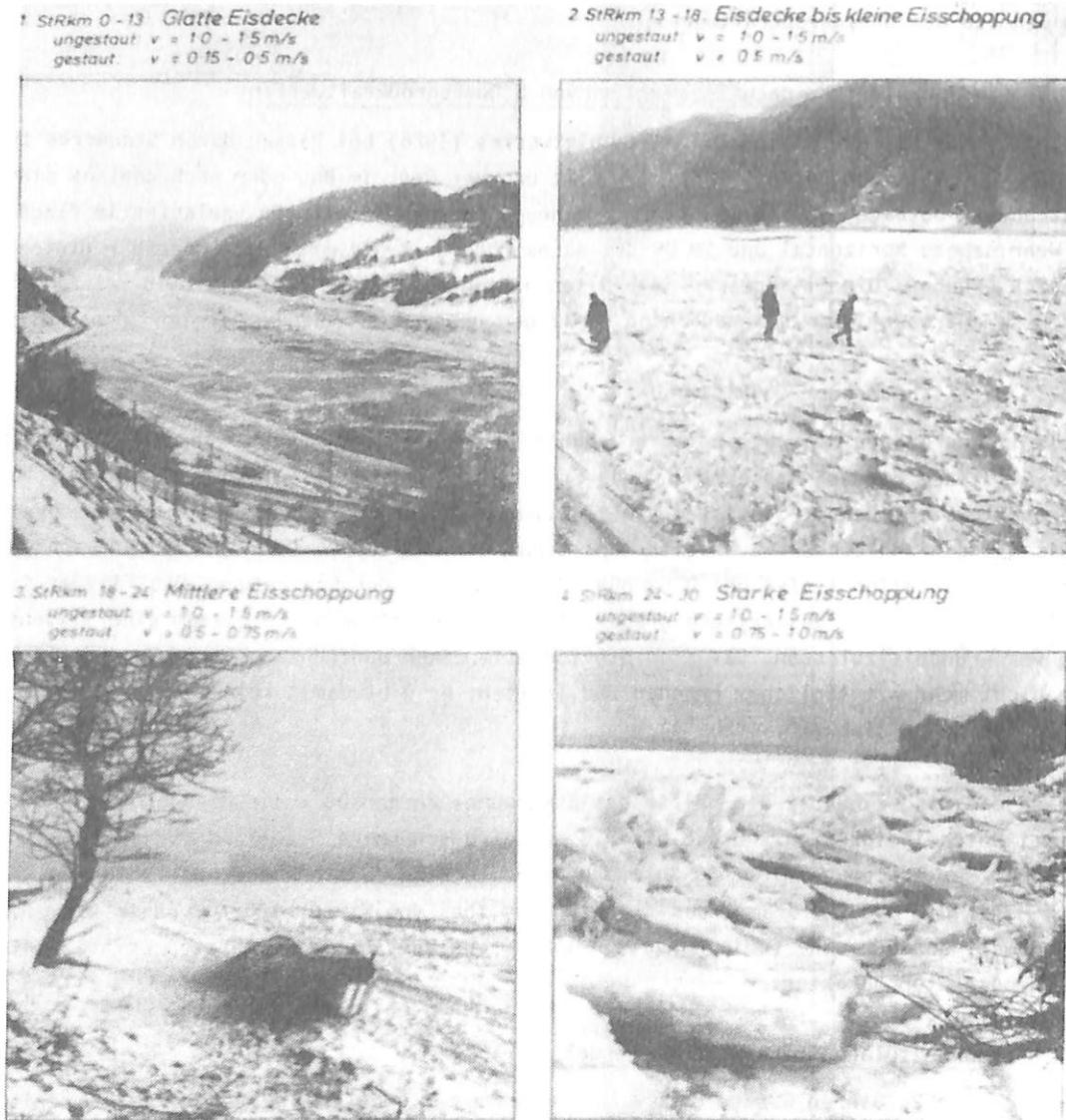


Abb. 4 Eisbedeckung im StR Ybbs-Persenburg  
 charakteristisch für eine geschlossene Kette von  
 Großkraftwerken

Bild 4 zeigt eine zu große Schoppung gegenüber dem Normalfall der geschlossenen österreichischen Kette, da von dort ab stromauf damals noch eine "freie" Donau von rund 80 km Länge bestand.

Bemerkung: der Winter 1962/63 war einer der kältesten der neueren Zeit. Sein Kern umfaßte 99 Tage, die Schifffahrtssperre betrug 91 Tage. Die Eisstöße waren sehr groß. Im Str Ybbs stand auch ein Eisstoß, doch war er durch die Abwärme des Raumes Linz (Industrie und Traun) nicht voll ausgebildet. Der Winter 1963/64 war etwas wärmer. Der Kern umfaßte 60 Tage, die Schifffahrtssperre betrug 53 Tage. Es war der erste Winter des Str Aschach. Die Eisbedeckung war vollkommen und brachte ihm den Titel "Kälte Loch" ein. - Der Abbau des Eises erfolgte in beiden Wintern reibungslos. Unbedeutende Hochwasserstände traten frühestens 5 Tage nach Eisfreiheit auf.

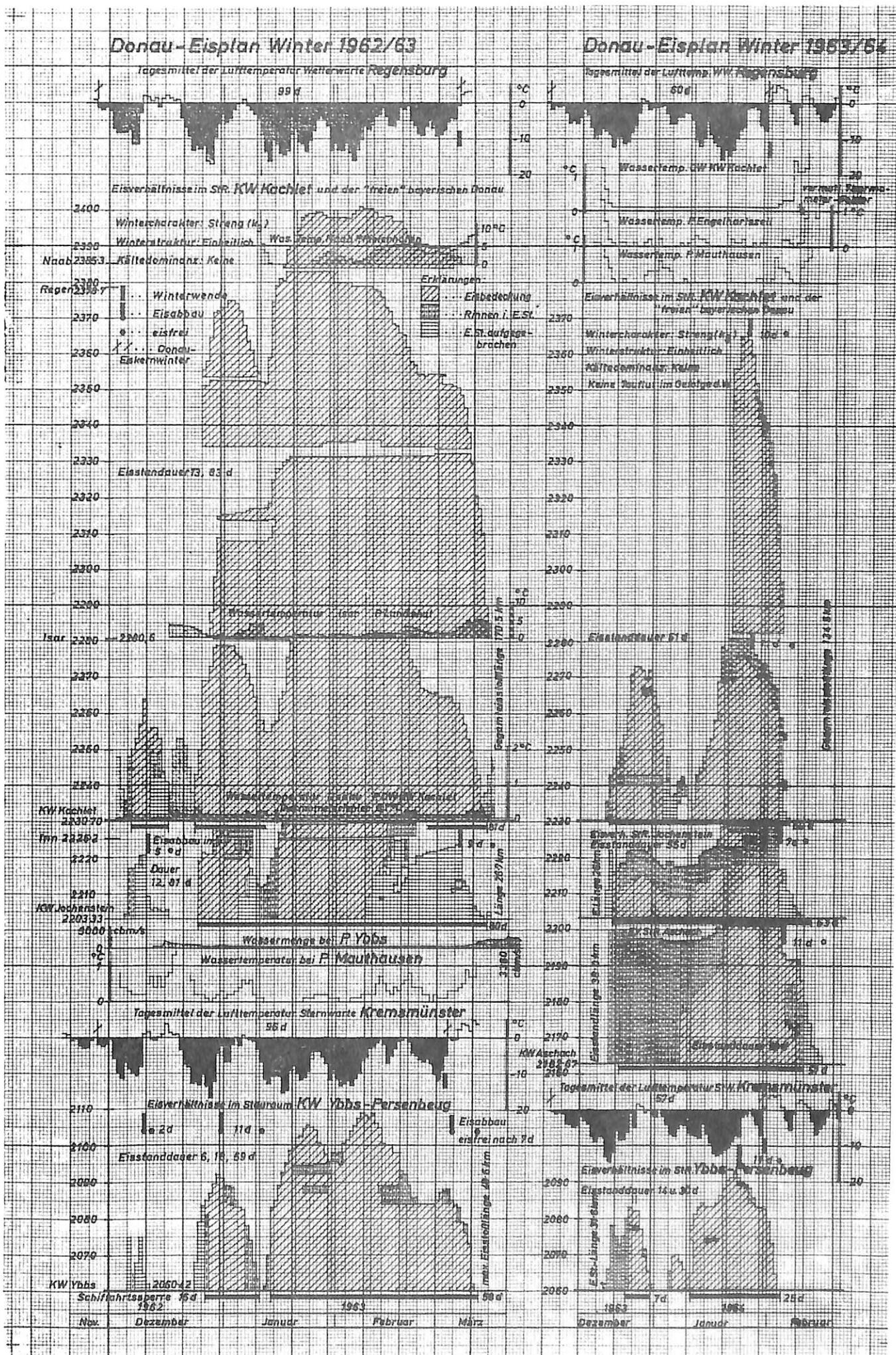


Abb. 5: Donau-Eispläne der Winter 1962/63 (k<sub>3</sub>) und 1963/64 (k<sub>5</sub>)





#### 4. Schlußfolgerungen

##### 4.1 Weiteres Auftreten von Eis

Diese Ausführungen erläuterten die Eisverhältnisse im bayerischen Grenzbereich und längs der österreichischen Donau hinreichend genau. Nach den meteorologischen Erkenntnissen sind auch weiterhin obermittelkalte und strenge Winter zu erwarten, die viel Eis bringen können. Dieses sollte weiterhin mittels amtlichen Eisberichten gewissenhaft registriert werden.

##### 4.2 Eisbekämpfung

Die Forderung aller früheren Eisforscher an der Donau war, alle neuzeitlichen Mittel einzusetzen, um die Eisbildung zu bekämpfen oder zu verhindern. Der technische Fortschritt ermöglicht es heute, der Donau auf -zig Kilometer soviel Abwärme von Industrien zuzuführen, um Eis in großer auftretender Menge zu bekämpfen. Erforderlich ist bei der Raumplanung, die lebenswichtigen Bedürfnisse der Donau zu berücksichtigen.

##### 4.3 Kontrolle der eingeleiteten Abwärme

Feststellung der Einleitung bestehender Kühlwässer in die Donau mittels Flugüberwachung (Infrarotgeräte etc.) auch im Winter. Verhinderung thermaler Vergiftung durch Einhaltung der Toleranz der Aufwärmspanne des Donauwassers von + 3,0°C. Anhand solcher Ergebnisse Aufstellung von selbstregistrierenden Wassertemperatur-Messern im Strom vor und nach Unstetigkeiten in der Donautemperatur und auf Länge der Fahnen. Da die Donau am rechten Ufer viel mehr warmes Wasser bekommt und sich lange Fahnen bilden, sind Meßeinrichtungen links- und rechtsufrig mit Uferabstand zu errichten.

##### 4.4 Wärmelastplan

Wir stehen heute in Österreich am Anfang einer großen Abwärmeproduktion. Es ist erforderlich die Aufstellung von Wärmelastplänen für den Sommer und den Winter notfalls streckenweise getrennt für links- und rechtsufrige Bereiche schnell vorzunehmen. Notwendig werden auch Studien über den Einfluß der Wassertemperatur und der Eisverhältnisse der Nebenflüsse auf die Donau sein; so in Österreich zumindest des Inn mit Salzach, der Traun und der Enns. Die Einbringung größerer Abwärmemengen sollte symmetrisch längs des Stromes erfolgen, damit die ganze Wasserführung schnell mit der Wärme durchmischt wird.

##### 4.5 Stehende oder sehr langsam fließende Gewässer

Für stehende Gewässer (langsam fließend) wie in Schifffahrtskanälen gilt im wesentlichen dasselbe. Ihre Unpassierbarkeit im Winter infolge von Eis ist unter Umständen um Wochen länger als in den benachbarten Donau.

#### 5. Schlußbemerkung

Der wirtschaftliche Fortschritt und der Wohlstandskonsum erzwingen einen laufend sich steigernden Energiebedarf und Umweltschutz. Energienutzung ist unabdingbar mit Wasserbedarf verbunden. Die Donau kann und muß ihn auch decken. Über eine Generation hinaus werden sich aber neuralgische Punkte an ihrem Lauf in Österreich bemerkbar machen. Heute kann von West nach Ost auf den StR Aschach (Eiskeller) und die Räume unmittelbar stromab von Linz und Wien hingewiesen werden. Der StR Aschach braucht - wie dargelegt - zur Eisschmelzung warmes Wasser; die beiden anderen produzieren bereits soviel Abwärme wie ein Kernkraftwerk, und haben in ihrer Industrie bzw. dem Großstadtbedarf eine große Wachstumsrate, so daß sie bis min. 40 km unterhalb keine enorme Einleitung von Abwärme vertragen. Mit diesen Fakten muß sich die Raumplanung auseinandersetzen und kann nicht die Initiative anderen überlassen.

L i t e r a t u r h i n w e i s e:

1. Strauch, K. Th.: Das Eisproblem bei Wasserkraftwerken.  
Die Wasserwirtschaft 46, H. 4, 1956.
2. van Rinsum, R.: Die Eisverhältnisse der Donau.  
Selbstverlag 1962.
3. Lászlóffy, W. und Szesztay, K.: Vorhersage der Eisverhältnisse in Flüssen mit besonderer Berücksichtigung der Donau.  
Hydrographisches Zentralbüro, Wien 1964.
4. Wallner, J.: Eisbildung und Warmwassereinleitung in Bundeswasserstraßen.  
Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen 3, 1973.
5. Gabler, R.: Beitrag zur Kenntnis der Hochwassergefahr durch Eisstöße für Wien.  
Österreichische Ingenieur-Zeitschrift 8, H. 3, 1965.
6. Österreichische Donaukraftwerke AG Kretschmer, O.: Studie über die Eisverhältnisse der Donau im Raum Ybbs-Aschach vor und nach Errichtung der Donaukraftwerke.  
Selbstverlag, 1964.
7. Kretschmer, O.: Standortwahl für Kernkraftwerke an der Donau in Österreich.  
Selbstverlag, 1972.
8. Kretschmer, O.: Über die Eisverhältnisse der Donau vor und nach Errichtung der Österreichischen Donaukraftwerke ab 1956.  
Selbstverlag, 1972.
9. Eckel, O. und Reuter, H.: Zur Berechnung des sommerlichen Wärmeumsatzes in Flußläufen.  
Särtryck ur Geografiska Annaler, H. 3/4, 1950.
10. Flinspach, D. und Flig, H.: Die Aufstellung von Wärmelastplänen durch rechnerische Simulation der Wärmeaustauschvorgänge - dargelegt am Beispiel des "Wärmelastplanes Rhein".  
Wasserwirtschaft 62, H. 5, 1972.
11. Kuhn, W.: Physikalisch-meteorologische Überlegungen zur Nutzung von Gewässern für Kühlzwecke.  
Arch.Met.Geoph.Biokl., Ser. A, 21, S. 95 - 122, 1972.
12. Güneberg, F.: Abwärme in Gewässern.  
Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 17, H. 1, 1973.
13. Lorenz, D.: Messungen der Bodenoberflächentemperatur vom Hubschrauber aus.  
Berichte des Deutschen Wetterdienstes 82, H. 11, 1962.
14. Kretschmer, O.: Über Eisverhältnisse und Standortwahl von Kernkraftwerken an der österreichischen Donau.  
Österreichische Wasserwirtschaft, Jhg. 25, H. 11/12, S. 243-253, 1973.
15. Kretschmer, O.: Über die Winterkälte im bayerisch-österreichischen Donautal.  
Wetter und Leben, Jhg. 26, S. 205-220, 1974.
16. Kretschmer, O.: Über Extremwerte von Winterkältesummen und Winterkälteperioden im bayerisch-österreichischen Donautal.  
Wetter und Leben, Jhg. 27, im Druck, 1975.



ПРОГНОЗЫ СРОКОВ ПОЯВЛЕНИЯ ЛЬДА НА ДУНАЕ

Ефимова З.А., Шаночкин С.В.

VORHERSAGE DES AUFTRETENS VON EIS AUF DER DONAU

Efimova Z.A., Šanočkin S.V.

Резюме

На основании карт изокоррелят аномалий давления за сентябрь и октябрь над Северным полушарием и сроков появления льда на Дунае выделены районы Канады и Атлантики, атмосферные процессы над которыми определяют начало ледообразования на р. Дунай. Получены схемы для составления прогноза сроков появления льда, основанные на разложении полей давления воздуха у поверхности Земли и H-500 на естественные ортогональные составляющие и дискриминантном анализе.

Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt und analysiert die Berechnungsergebnisse der Korrelationskoeffizienten zwischen den Zeiten des Eiserscheinens auf der Donau und den Anomalien von Luftdruck und Lufttemperatur in verschiedenen Monaten an verschiedenen Punkten der nördlichen Halbkugel. Die aufgestellten Karten der Linien gleicher Korrelationskoeffizienten gestatten, die für die Vorhersage der Zeit des Eiserscheinens maßgebenden Gebiete, zu ermitteln.

Es wurde die Beziehung zwischen Sonnenaktivität und Eiserscheinungen erforscht. Es wurde gezeigt, daß der Einfluß der Sonnenaktivität in den anomalen Eiserscheinungsjahren viel deutlicher zum Vorschein kommt. Als Ergebnis erhielt man die vorläufigen Schemata der Eisvorhersagen, die sich auf die Zerlegung der Felder von Anomalien von Luftdruck und -temperatur in den ausgewählten Gebieten in natürliche orthogonale Komponenten stützen. Dabei wurde der Einfluß der Sonnenaktivität auch auf die Ergebnisse der statistischen Analyse der Zeitserien des Eiserscheinens berücksichtigt.

Ледовый режим реки Дунай достаточно полно освещен в литературе, но исследований прогностического профиля имеется мало (3, 4, 7, 8). В предыдущих работах ГГИ были рассмотрены вопросы прогноза степени суровости зимы и продолжительности ледовых явлений (4). В данном докладе излагаются 2 схемы долгосрочного прогноза дат начала ледовых явлений на Дунае, основанные на использовании данных о давлении воздуха у поверхности земли и средних значений H-500. Исследование проводилось для 4-х участков реки, расположенных в разных климатических и орографических районах: I - от г.Братиславы до г.Будапешта; II - от г.Будапешта до г.Нови-Сада; III - от г.Корабии до г.Олтеницы; IV - ниже г.Олтеницы.

В настоящее время основным приемом, используемым при разработке методов долгосрочных ледовых прогнозов, является регрессионный анализ. Обычно он применяется в сочетании с различными приемами, позволяющими сократить объем исходной информации о состоянии атмосферы за предшествующий прогнозируемому ледовому явлению период. Дело в том, что для получения устойчивого решения с помощью регрессионного анализа длина рядов должна в несколько раз превосходить число предсказателей, при помощи которых можно достаточно хорошо описать циркуляцию атмосферы в исходный и предшествующие периоды. Выполнить это требование в полной мере при долгосрочных прогнозах ледовых явлений, естественно, не представляется возможным, поэтому каждый раз приходится вводить ограничения, причем иной раз весьма значительные. Для сокращения объема информации иногда используется материал наблюдений с очень ограниченным числом точек в центрах действия атмосферы, либо в число предсказателей вводятся различные индексы [4], характеризующие состояние атмосферной циркуляции на больших пространствах вплоть до всего северного полушария. В настоящей работе в качестве приема объема исходной информации использовался метод разложения полей по естественным ортогональным функциям. Этот метод широко используется, в частности, в ГМЦ при создании методов прогноза появления льда на реках СССР (6).

В качестве предсказателей берутся несколько первых коэффициентов такого разложения и тем самым объем данных сокращается в несколько раз без существенной потери информации.

Исследования в области общей циркуляции атмосферы для целей долгосрочных прогнозов показывают необходимость рассмотрения атмосферных процессов над всем северным полушарием. В качестве характеристики атмосферных процессов при разработке методики прогноза появления льда на р. Дунай использовались поля приземного давления воздуха. Предварительно производился отбор наиболее показательных районов. Для этой цели строились карты изокоррелят сроков появления льда на р. Дунай с аномалиями давления воздуха в 70 пунктах северного полушария за различные месяцы. Выполненные проработки позволили в качестве первого приближения остановиться на значениях Н-500 в сентябре в районах Канады и Атлантики:  $130^{\circ}$ - $110^{\circ}$  -  $90^{\circ}$  -  $70^{\circ}$  -  $50^{\circ}$  з.д. и  $80^{\circ}$  -  $60^{\circ}$  -  $40^{\circ}$  -  $20^{\circ}$  з.д. -  $20^{\circ}$  в.д., ограниченных с севера  $75^{\circ}$  с.ш. и с юга  $40^{\circ}$  с.ш. Значения Н-500 снимались в точках пересечения долгот с широтами через  $10^{\circ}$ .

В качестве предсказателей использовались коэффициенты разложения полей Н-500 за сентябрь на собственные векторы их ковариационной матрицы. При построении уравнения регрессии ограничили 6 коэффициентами разложения. Уравнение для прогноза появления льда на Дунае имеет следующий вид:

$$\Delta D_{п.л.} = C_0 + C_1 V_1 + C_2 V_2 + C_3 V_5 + C_4 V_7 + C_5 \underline{V_{III}} + C_6 \underline{V_{VII}} \quad [1]$$

- где  $\Delta D_{п.л.}$  - отклонение от нормы дат появления льда на Дунае;  
 $C_0$  - свободный член уравнения;  
 $C_1 \dots C_6$  - коэффициенты при параметрах разложения поля Н-500 в сентябре;  
 $V_1, V_2, V_5, V_7$  - параметры разложения поля Н-500 в районе  $80^{\circ}$ - $60^{\circ}$ - $40^{\circ}$ - $20^{\circ}$ -з.д.- $20^{\circ}$  в.д., ограниченном с севера  $75^{\circ}$  с.ш. и с юга  $45^{\circ}$  с.ш.  
 $\underline{V_{III}}, \underline{V_{VII}}$  - параметры разложения поля Н-500 в районе  $130^{\circ}$ - $110^{\circ}$ - $90^{\circ}$ - $70^{\circ}$ - $50^{\circ}$  з.д., ограниченном с севера  $70^{\circ}$  с.ш. и с юга  $40^{\circ}$  с.ш.

Оправдываемость проверочных прогнозов за ряд лет, использованных при разработке метода прогноза (1948-1971 гг.) представлена в таблице 1.

Таблица 1

Участок реки	$\frac{S}{C_i}$	$\eta$	P%
Братислава-Будапешт	0,72	0,75	67
Будапешт-Нови-Сад	0,62	0,79	83
Корабия-Олтеница	0,72	0,73	71
Ниже Олтеницы	0,79	0,67	67

Были составлены проверочные прогнозы появления льда на Дунае в 1972, 1973, 1974 гг. (независимый ряд лет). Результаты проверки прогноза показали, что в 2-х годах: 1973 и 1974 гг. прогноз полностью оправдался на всех 4-х участках Дуная (табл.2).

В настоящее время ведется работа по усовершенствованию описанной схемы долгосрочного про-

гноза сроков появления льда на р. Дунае. Необходимо прежде всего установить наиболее оптимальное число предсказателей, что является делом весьма сложным и трудоемким. Кроме того, следует ввести новые предсказатели для более полного учета атмосферной циркуляции в данный и предшествующие моменты времени. Очевидно, что для улучшения качества долгосрочных прогнозов сроков появления льда на Дунае нужно учитывать не только приземное давление или на высоте изобарических поверхностей, но и ввести характеристики, учитывающие термическое состояние атмосферы, поскольку оно в значительной мере определяет и ее циркуляцию. В качестве такой характеристики можно использовать среднюю месячную температуру воздуха у поверхности Земли, так как она характеризует в среднем состояние подстилающей поверхности и самой атмосферы до довольно значительных высот.

Таблица 2

Участок реки	Дата появления льда в отклонениях от нормы ( $\Delta D$ )															
	I				II				III				IV			
Год	$\Delta D$ прогн.	$\Delta D$ факт.	ошибка в днях	$\delta$ доп.	$\Delta D$ прогн.	$\Delta D$ факт.	ошибка в днях	$\delta$ доп.	$\Delta D$ прогн.	$\Delta D$ факт.	ошибка в днях	$\delta$ доп.	$\Delta D$ прогн.	$\Delta D$ факт.	ошибка в днях	$\delta$ доп.
1972	30	-3	33	12	23	-5	28	13	34	10	24	12	28	11	17	13
1973	нб	нб	0		нб	нб	0		нб	нб	0		нб	нб	0	
1974	нб	нб	0		нб	нб	0		нб	нб	0		нб	нб	0	

В последние годы для предсказания метеорологических элементов используется метод дискриминантного анализа (1, 2, 5). Основная цель метода заключается в разделении набора исходной информации на классы, причем структура классов задается заранее. Дискриминантный анализ тесно примыкает к методу разложения функций по естественным ортогональным составляющим. Различие заключается в том, что в первом случае при решении обобщенной проблемы собственных значений и главных векторов пучка форм определяется не только матрица, характеризующая ковариации по всей совокупности исходных векторов, но и матрица ковариации между классами.

В данной работе осуществлена попытка применить метод дискриминантного анализа для разработки долгосрочных прогнозов сроков появления льда на реке Дунае. Данные по срокам появления льда были предварительно разбиты на два класса: выше нормы и ниже нормы. В качестве исходной информации, характеризующей общую циркуляцию атмосферы, использована совокупность полей аномалии приземного давления на территории северного полушария за март, июнь-сентябрь месяцы. Эта совокупность была также разбита на два класса в соответствии с указанным выше делением. Общая длина использованных рядов составила 38 лет (1932-1969).

Задача дискриминантного анализа решается следующим образом. Имеется  $m$  реализаций (полей)  $p$ -мерного случайного вектора в виде матрицы

$$P = \left\{ p_{ij} \right\}_{i=1}^m, \quad j=1, \dots, n \quad [2]$$

Эту совокупность разбивают на классы или градации в соответствии с классами прогнозируемых явлений. В нашем случае, как уже было сказано, разделение проводилось на 2 класса

$$A = \left\{ a_{ij} \right\}_{i=1}^{m_1}, \quad j=1, \dots, n$$

$$B = \left\{ b_{ij} \right\}_{i=1}^{m_2}, \quad j=1, \dots, n \quad [3]$$

где  $m_1$  - число полей класса А,

$m_2$  - число полей класса В.

Не останавливаясь подробно на самом дискриминантном анализе, отметим, что определение собственных значений и главных векторов пучка форм сводится к решению обобщенной проблемы собственных значений, т.е. к решению уравнения

$$(R^* - \lambda R)C = 0 \quad [4]$$

где  $R^*$  - ковариационная матрица между классами А и В,

$R$  - матрица ковариаций по всей совокупности исходных данных

$$R^* = \left\{ r_{il}^* \right\}_{i=1}^n, \quad l=1, \dots, n$$

$$R = \left\{ r_{il} \right\}_{i=1}^n, \quad l=1, \dots, n \quad [5]$$

Известно, что если пучок форм  $(R^* - \lambda R)$  построен для 2-х классов, то в качестве предсказателей следует взять только первые коэффициенты разложения, соответствующие собственным значениям пучка форм. Считается, что если в качестве предиктора выбирается коэффициент разложения, являющийся информативным по отношению к этим двум классам, то он вполне удовлетворительно характеризует и промежуточные значения класса "близко к норме".

Применение дискриминантного анализа предполагает строгое соотношение между длиной исходных рядов и размерностью исследуемых векторов (узлов сетки, в которых снимаются значения аномалий давления). Решение задачи можно считать статистически устойчивым, когда длина рядов в несколько раз превышает размерность векторов. Поэтому в первую очередь решалась задача о снижении размерности вектора-предиктора. Из 15 предварительно выбранных узлов сеточной области, данные  $\Delta P$  в которых наиболее коррелятивно связаны с предиктантами, осуществлялось оптимальное выделение районов с помощью приема, предложенного в работе (5). Анализировались величины

$$d_z^2 = \overline{P_z^2(A)} + \overline{P_z^2(B)} - 2\overline{P_z(A)P_z(B)} \quad z=1, 2, \dots, n \quad [6]$$

где  $d_z^2$  - средний квадрат расстояния между градациями в Z-ом узле сетки.

В качестве наиболее информативных узлов сеточной области были выбраны первые семь с максимальными значениями  $d_2^2$ .

Дальнейшая задача состояла в определении и анализе первых собственных значений и соответствующих им первых главных векторов. С их помощью были вычислены предсказатели  $B_{III...X}$  по полям давления для сроков появления льда. Прогностическое уравнение имеет вид:

$$\Delta D_{п.л.} = C_0 + C_1 B_{III} + C_2 B_{VII} + C_3 B_{VIII} + C_4 B_{IX} + C_5 B_X \quad [7]$$

где  $\Delta D_{п.л.}$  - отклонение от нормы дат появления льда на 4-х участках Дуная;

$C_0$  - свободный член уравнения;

$C_1...C_5$  - коэффициенты регрессии;

$B_{III}, B_{VII}, B_{VIII}, B_{IX}, B_X$  - первые временные коэффициенты разложения полей давления для 4-х участков Дуная за март, июль, август, сентябрь, октябрь.

Оправдываемость проверочных прогнозов за годы, вошедшие в разработку метода (1932-1969 гг.) представлена в таблице 3.

Участок реки	$\frac{S}{\bar{\sigma}}$	$\eta$	P%
I	0,67	0,74	69
II	0,68	0,72	66
III	0,64	0,76	66
IV	0,71	0,70	55

По уравнению [7] были составлены проверочные прогнозы появления льда на р. Дунае на 1970-1974 гг. (независимый ряд). Результаты проверки приведены в таблице 4.

В данном докладе представлен опыт использования современных статистических методов, основанных на разложении метеорологических полей и дискриминантного анализа их для прогноза появления льда на р. Дунае. Работа по усовершенствованию методики продолжается.

Таблица 4

Участок реки	Дата появления льда в отклонениях от нормы ( $\Delta D$ )															
	I				II				III				IV			
Год	$\Delta D$ прогн.	$\Delta D$ факт.	ошибка в днях	$\delta$ доп.	$\Delta D$ прогн.	$\Delta D$ факт.	ошибка в днях	$\delta$ доп.	$\Delta D$ прогн.	$\Delta D$ факт.	ошибка в днях	$\delta$ доп.	$\Delta D$ прогн.	$\Delta D$ факт.	ошибка в днях	$\delta$ доп.
1970	+19	+1	18	12	+15	+1	14	13	+44	+14	30	12	+37	+18	19	13
1971	+35	+15	20		+25	+14	11		+34	+11	23		нб	+12	45	
1972	+10	-3	13		+5	-5	10		+17	+10	7		+17	+11	6	
1973	+25	нб	25		нб	нб	0		нб	нб	0		нб	нб	0	
1974	+15	нб	35		нб	нб	0		нб	нб	0		+30	нб	20	

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Багров Н.А. Предсказание месячного количества осадков, "Метеорология и гидрология", 1966, №7, с.3-12.
2. Карпеев Г.А. О дискриминантном анализе как способе прогноза метеорологических полей, Тр. ГМЦ, 1969, вып. 44, с. 53-66.
3. Макаревич Т.Н., Ефимова З.А. Характерные черты осенне-зимнего ледового режима р. Дунай, Тр. ГГИ, 1962, вып. 80, с. 126-170.
4. Макаревич Т.Н., Ефимова З.А., Савина Л.К. Долгосрочный прогноз продолжительности ледовых явлений на р. Дунай, Тр. ГГИ, 1972, вып. 197, с. 3-24.
5. Николаев Ю.В. Преобразование информации в приложении к задачам гидрометеорологии. Л., Гидрометеоиздат, 1969, с. 36-49.
6. Савченкова Е.И. Долгосрочный прогноз сроков появления льда на реке Лена, Тр. ГМЦ, 1972, вып. 49, с. 44-48.
7. Щербак А.В., Солопенко Л.И. Осенне-зимний ледовый режим советского участка р. Дуная, Тр. Укр.НИГМИ, 1970, вып. 97, с. 70-83.
8. Töry K. A Duna es szabalyozasa. Budapest, 1952, 454 p.

УСЛОВИЯ ПОЯВЛЕНИЯ ЛЕДОСТАВА В НИЗОВЬЯХ ДУНАЯ  
И МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Щербак А.В., Солопенко Л.И.

DAS AUFTRETEN VON EISSTAND AUF DER UNTEREN  
DONAU UND MÖGLICHKEITEN DER VORHERSAGE

Ščerbak A.V., Solopenko L.I.

Резюме

Ледовый режим советского участка Дуная весьма неустойчивый: вероятность появления льда здесь составляет 82%, а установления ледостава - 59% (1931-1972 гг.).

Разработаны схема расчета и методика краткосрочного прогноза времени установления ледостава в низовьях Дуная. Они основаны на применении установленных зависимостей суммы отрицательных среднесуточных температур воздуха, необходимой для начала ледостава, и критической температуры воздуха от определяющих гидрометеорологических факторов.

Метод ориентировочных прогнозов продолжительности ледостава на советском участке Дуная основан на оценке степени суровости зимы и учете различий в ходе показателя комплекса атмосферных макропроцессов в осенний период.

Zusammenfassung

Die Eisverhältnisse auf dem sowjetischen Donauabschnitt sind sehr unbeständig. Die Wahrscheinlichkeit des jährlichen Auftretens von Treibeis beträgt 82% und von Eisstand 59% (Zeitraum 1931-1972).

Es wurde das Berechnungsschema und die Methodik der Vorhersage des Auftretens von Eisstand für den Unterlauf der Donau ausgearbeitet. Das Verfahren berücksichtigt die Abhängigkeiten von folgenden bestimmenden hydrometeorologischen Faktoren: Summen der Tagesmittel negativer Lufttemperaturen, die für den Beginn des Eisstandes maßgebend sind und die kritischen Lufttemperaturen.

Die Methode der Vorhersage der Eisstanddauer auf dem sowjetischen Donauabschnitt beruht auf der Bewertung des Grades der Winterstrenge und der Berücksichtigung der Unterschiede von Kennziffern für großräumige atmosphärische Vorgänge während der Herbstperiode.

Река Дунай является главной водной артерией стран Центральной и Юго-Восточной Европы. Все возрастающее использование реки как транспортной магистрали и источника энергии обуславливает необходимость всестороннего изучения ледового режима и разработки методов прогноза отдельных его элементов.

В работе Т.Н.Макаревич и З.А.Ефимовой (8), посвященной исследованию осенне-зимнего ледового режима р.Дуная, приводится весьма подробный обзор литературы, освещающей те или иные вопросы ледового режима Дуная. Не останавливаясь поэтому на повторении обзора выполненных в придунайских странах исследований, здесь только отметим, что значительная их часть посвящена в основном характеристике ледового режима; работ по разработке методов прогноза элементов ледового режима значительно меньше.

К работам обобщающего характера относится доклад о ледовом режиме, изданный Дунайской Комиссией (4); достаточно подробная характеристика ледовых явлений дана в монографии "Гидрология Дуная от Базиаша до Измаильского Чатала" (18).

В указанных работах приводятся характеристики ледового режима в целом для Нижнего Дуная и по отдельным его пунктам от г.Турну-Северин до устья (по Сулинскому рукаву дельты Дуная); особенности же ледообразования на советском участке реки в этих работах не рассматриваются.

Ледовый режим дельты Дуная, в том числе и ее Килийского рукава, описан в монографии "Гидрология устьевой области Дуная" (3) в ней использованы данные наблюдений по 1961 г. Краткое описание этого же вопроса по устьевому участку реки приводится также в работе (19) и ряде методических записок и научных отчетов Дунайской гидрометеорологической обсерватории. Характеристике ледового режима советского участка Дуная посвящены работа Н.Ф.Вагина (2), а также ряд обобщений результатов выполненных в Украинском научно-исследовательском гидрометеорологическом институте исследований по разработке методов краткосрочных прогнозов дат начала ледовых явлений (15, 16).

Ниже приводятся результаты выполненных в Украинском НИГМИ исследований по изучению условий установления ледостава на советском участке Дуная с целью разработки метода, обеспечивающего возможность составления предупреждений о времени наступления ледостава в низовьях Дуная.

Совместный анализ термического и ледового режима советского участка Дуная произведен по данным наблюдений 4-х водомерных постов: Рени, Измаил, Килия и Вилково за период с 1945 по 1972 год., за который имеются сведения о температуре воздуха и воды. Для получения количественных характеристик ледового режима дополнительно использованы данные о ледовых явлениях с 1931 по 1944 гг., заимствованные из работы (3).

Исследуемый участок реки расположен на крайнем юго-западе Европейской части СССР. Относительно мягкая зима, характеризующаяся неустойчивостью температурного режима, обуславливает на исследуемом участке реки непостоянство ледовых явлений во времени. Так, например, за период с 1931 по 1972 г. устойчивые ледовые явления в низовьях Дуная имели место в 22 годах из 40 (55%), в 11 годах (28%) они отсутствовали или же были весьма кратковременными; в остальные годы наблюдались периоды с неустойчивыми ледовыми явлениями, когда похолодания обусловившие появления льда или даже установление ледостава, сменялись интенсивными потеплениями, приводящими к очищению реки ото льда. При этом ледообразование нередко возобновлялось 2-3 раза.

Самое раннее установление ледостава на участке отмечено 20 декабря (1948 г.), самое позднее - 11 февраля (1956 г.); средняя дата приходится на 12-14 января.

Вероятность появления льда на рассматриваемом участке Дуная составляет 82%, а установления ледостава - 59% (1931-1972 гг.). За указанный период ледостав (продолжительностью более 5-ти дней) устанавливался в 21 году, причем из них 15 лет приходится на период до 1951г. (рис.1), т.е. повторяемость установления ледостава в последние 20 лет существенно уменьшилась.

Характерной особенностью ледового режима рассматриваемого участка (как и всего Нижнего Дуная (4, 8)) является большая амплитуда сроков появления льда и установления ледостава, достигающая 52-54 дня. Таким образом, установление ледостава в низовьях Дуная может наблюдаться в любую часть зимы. Наибольшая повторяемость дат начала ледостава приходится на вторую декаду января.

Неподвижный ледяной покров в низовьях Дуная устанавливается в результате образования ледяных перемычек и смерзания льдин, поступающих сверху. Образованию этих перемычек способствуют заторно-зажорные явления, которыми почти ежегодно сопровождается развитие ледообразования в низовьях Дуная в осенне-зимний период (3, 17).

1931/32				
1932/33				
1933/34				
1934/35				
1935/36				
1936/37				
1937/38				
1938/39				
1939/40				
1940/41				
1941/42				
1942/43				
1943/44				
1944/45				
1945/46				
1946/47				
1947/48				
1948/49				
1949/50				
1950/51				
1951/52				
1952/53				
1953/54				
1954/55				
1955/56				
1956/57				
1957/58				
1958/59				
1959/60				
1960/61				
1961/62				
1962/63				
1963/64				
1964/65				
1965/66				
1966/67				
1967/68				
1968/69				
1969/70				
1970/71				
1971/72				
Год	XII	I	II	III

Рис. I. Продолжительность ледостава в Килийском рукаве Дуная у г.Измаила.

Продолжительность осенне-зимнего ледохода, предшествующего установлению ледостава, составляет на отдельных участках Нижнего Дуная в среднем 4-8 дней. В Килийском рукаве дельты Дуная продолжительность предледоставного периода обычно равна 2-5 дням (табл.1); в 1962/63 и 1968/69 гг. осенне-зимний ледоход продолжался соответственно 21 и 13 дней. Это связано с прерывистостью похолоданий, обусловивших появление льда.

Анализ температурных условий предледоставного периода показывает, что продолжительность последнего определяется взаимодействием метеорологических и гидравлических факторов. Так, например, в 1946/47, 1949/50, 1955/56 гг., несмотря на повышенную водность, период ледохода был непродолжительным (2-4 дня) вследствие весьма интенсивного похолодания. Слабое с перерывами похолодание в 1968/69 г. (средняя температура воздуха предледоставного периода составила  $-3,7^{\circ}$ ) при высокой водности обусловило продолжительный период ледохода, предшествующий началу ледостава. При низкой водности (1948/49, 1953/54, 1963/64 гг.) для установления ледостава достаточными оказались периоды похолоданий со средней интенсивностью до  $-6^{\circ}$ .

Зимний сезон	Появление льда		Установление ледостава		Продолжительность ледохода в днях	Сумма отрицательных средних суточных температур воздуха за период ледохода	Средняя температура воздуха за период ледохода
	дата	уровень, см	дата	уровень, см			
1946/47	18/XII	218	20/XII	201	2	41,2	-13,7
1948/49	15/XII	43	19/XII	30	4	28,3	-5,7
1949/50	11/I	151	13/I	126	2	50,2	-16,7
1953/54	25/XII	-19	27/XII	-24	2	17,2	-5,7
1955/56	4/II	320	8/II	326	4	68,0	-13,6
1959/60	31/I	144	5/II	216	5	49,3	-9,9
1962/63	24/XII	111	14/I	214	21	99,6	-4,3
1963/64	5/I	93	10/I	74	5	35,4	-5,9
1968/69	7/I	238	20/I	86	13	52,1	-3,7
1971/72	17/I	70	19/I	76	2	33,4	-11,1

Таблица 1 Характеристика предледоставного периода на участке Килийского рукава дельты Дуная от Измаильского Чатала до Вилково

Таким образом, время установления неподвижного ледяного покрова на участках между образовавшимися ледяными перемычками зависит от интенсивности теплоотдачи (от метеорологических условий), морфометрических и гидравлических условий.

Основой разработки методов краткосрочных прогнозов появления льда и установления ледостава послужили достижения в области исследований процессов теплообмена, ледообразования и формирования покрова на реках, озерах и водохранилищах (В.Д.Комаров (7), Л.Г.Шуляковский (13, 14)). В результате этих исследований установлено, что для начала ледостава на участке необходимо выполнение двух условий: 1) должна произойти определенная для данных условий теплоотдача и 2) температура воздуха после выполнения первого условия должна быть не выше критической ( $\Theta_{кр}$ ).

В качестве относительной характеристики теплоотдачи принимается сумма средних суточных отрицательных температур воздуха  $[\sum \Theta_-]$ . При построении локальных зависимостей морфометрические и гидравлические условия, определяющие значения  $\sum \Theta_-$  и  $\Theta_{кр}$ , характеризуются величиной уровня воды. Расчет времени начала ледостава на участке производится по зависимостям

$$(\sum \Theta_-)_{мин} = f(H_{пр}) \quad [1]$$

$$\Theta_{кр} = \varphi(H_{пр}) \quad [2]$$

где  $[\sum \Theta_-]_{мин}$  - минимальная сумма средних суточных температур воздуха, необходимая для начала ледостава;  $H_{пр}$  - предледоставный уровень воды. Величина последнего берется обычно в день появления льда.

Прогнозы установления ледостава с заблаговременностью в несколько дней составляются по эмпирическим (физико-статистическим) зависимостям типа [1] и [2] или путем расчета с использованием данных о температуре воздуха по прогнозу погоды.

Указанные эмпирические зависимости для отдельных участков Среднего и Нижнего Дуная при-

водятся в работах (10, 18, 20 и др.), для советского участка Дуная - в работе инж. Т.С.Бу-  
хаевской, выполненной в Дунайской ГМО в 1962 г. В последней работе дата начала ледостава  
после накопления  $[\sum \Theta_-]_{\text{мин}}$  определялась в зависимости от перехода температуры воздуха через  
 $-8^\circ$  (что равносильно принятию  $\Theta_{\text{кр}} = \text{const}$ ). Это относится также и к ряду других исследова-  
ний (12).

Анализ данных табл.1 показывает, что принятие  $\Theta_{\text{кр}} = \text{const}$  может приводит к существенным  
погрешностям. Л.Г.Шуляковским (14) также показано, что введение в расчет переменной вели-  
чины  $\Theta_{\text{кр}}$ , определяемой по зависимости  $\Theta_{\text{кр}} = \Phi(H)$ , является особенно необходимым в работах  
где отрицательные температуры воздуха в период ледообразования неустойчивые.

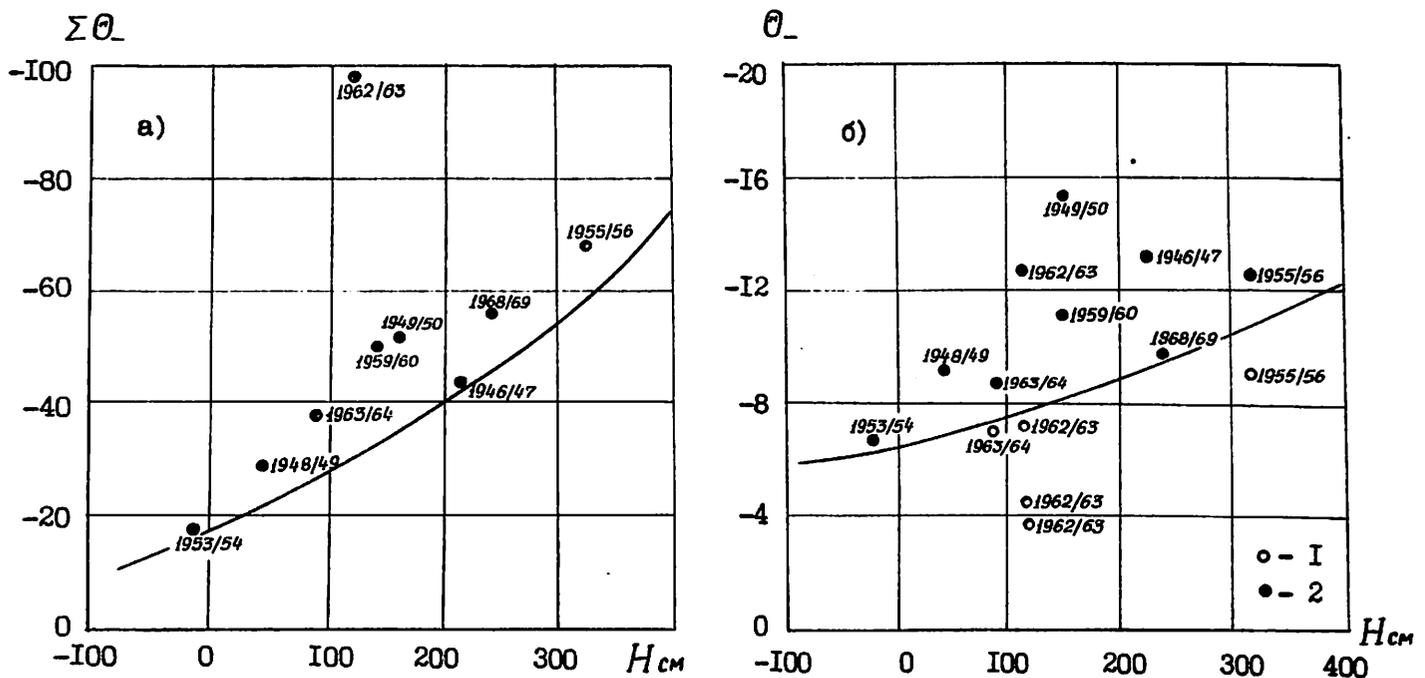


Рис.2. Зависимость минимальной суммы отрицательных температур воздуха ( $\sum \Theta_-$ )<sub>мин</sub>, необходи-  
мой для установления ледостава на участке Рени - Вилково (а), и критической темпера-  
туры воздуха  $\Theta_{\text{кр}}$  (б) от уровня воды на Дунае у г.Рени в день появления плавучего  
льда.

1 - температура воздуха после накопления ( $\sum \Theta_-$ )<sub>мин</sub> недостаточна для установления  
ледостава; 2 - температура воздуха после накопления ( $\sum \Theta_-$ )<sub>мин</sub> достаточна для ус-  
тановления ледостава.

На рис.2 представлены зависимости для определения значений суммы температур воздуха, необ-  
ходимой для начала ледостава на советском участке Дуная, и критической температуры воздуха  
по величине уровня воды на Дунае у г.Рени в день появления на участке плавучего льда. Рас-  
чет сроков установления ледостава на рассматриваемом участке с использованием полученных  
зависимостей дает вполне удовлетворительные результаты: в 95% случаев проверочных прогно-  
зов ошибка не превышает  $\pm 1$  день и в 100% случаев - допустимую погрешность, равную 2 дням.  
Последняя принята равной 2 дням в соответствии с наставлением по службе прогнозов, исходя  
из того, что прогноз температуры воздуха, используемый при установлении начала ледостава,  
выпускается с заблаговременностью 3-5 суток.

Однако, данные зависимости нельзя считать устойчивыми, поскольку они установлены на ограниченном материале - за рассматриваемый период имели место лишь 10 случаев устойчивого ледостава.

Исходя из этого, была предпринята попытка применения для расчета начала ледостава в низовьях Дуная зависимостей, общих для разных рек (Л.Г.Шуляковский (14)) :

$$\sum \Theta_{-} = -10,3 u^{1,22} b^{0,39} \quad [3]$$

$$\Theta_{кр} = -0,65 u b^{0,50} \quad [4]$$

Здесь  $\sum \Theta_{-}$  - сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха, необходимая для начала ледостава,  $\Theta_{кр}$  - критическая температура воздуха,  $u$  - скорость течения,  $b$  - ширина реки. Величины  $u$  и  $b$  определяются по графикам связи  $u = f(H)$  и  $b = \Phi(H)$ , где  $H$  - уровень воды в день появления льда.

Данные наблюдений на советском участке Дуная достаточно хорошо согласуются с расчетными зависимостями, полученными для других равнинных рек СССР. Это дает основание рекомендовать формулы [3] и [4] для расчета начала ледостава в низовьях Дуная с достаточной для практики точностью: в 90% случаев проверочных прогнозов ошибка не превышает  $\pm 1$  день и в 100% случаев - допустимую погрешность, равную 2 дням.

Величины  $[\sum \Theta_{-}]_{мин}$  и даты их накопления, а также наступления  $\Theta_{кр}$  определяется по прогнозу температуры воздуха. Начало ледостава принимается в дату наступления критической температуры воздуха.

В условиях неустойчивого температурного режима начало ледостава в низовьях Дуная может наблюдаться в любую часть зимы (с декабря по февраль). Поэтому важное значение приобретает анализ синоптико-циркуляционных условий для оценки ожидаемого характера процесса ледообразования. Разработка методов таких прогнозов основана на учете характеристик атмосферных процессов. Первоочередной задачей при этом является определение возможности предвидения общего характера предстоящей зимы. В этом состоит принципиальное отличие в подходе к решению задачи долгосрочного прогноза для рек с крайне неустойчивым ледовым режимом, таких, как Дунай (8). К такого рода исследованиям относится также работа А.И.Коверного (6). Важным вкладом в решение задачи долгосрочного прогноза ледовых явлений на Дунае являются результаты исследований по оценке степени суровости зимы, выполненные Н.А.Анискиной и И.Б.Ляпуновой (1).

В настоящей работе предпринята попытка оценки степени суровости предстоящего зимнего периода в низовьях Дуная. В качестве характеристики последней принята средняя аномалия температуры воздуха за период декабрь - февраль.

Основываясь на ранее выполненном исследовании (11), в качестве циркуляционных характеристик использовались типы макропроцессов, определяемые по индексам циркуляции в классификации А.Л.Каца (5). В качестве показателя  $[N]$  комплекса макропроцессов, под влиянием которых формируются погодные условия, предшествующие ледообразованию в рассматриваемом районе, принята разность числа дней  $n$  с циркуляцией формы В (по Кацу) и суммарного числа дней с циркуляцией форм З, Ц и С:

$$N = \frac{B}{n_{22+11+21+12}} - \left( \frac{3}{n_{22+11+21}} + \frac{C}{n_{22}} \right) \quad [5]$$

Цифровые индексы при  $n$  обозначают состояние циркуляции атмосферы [5].

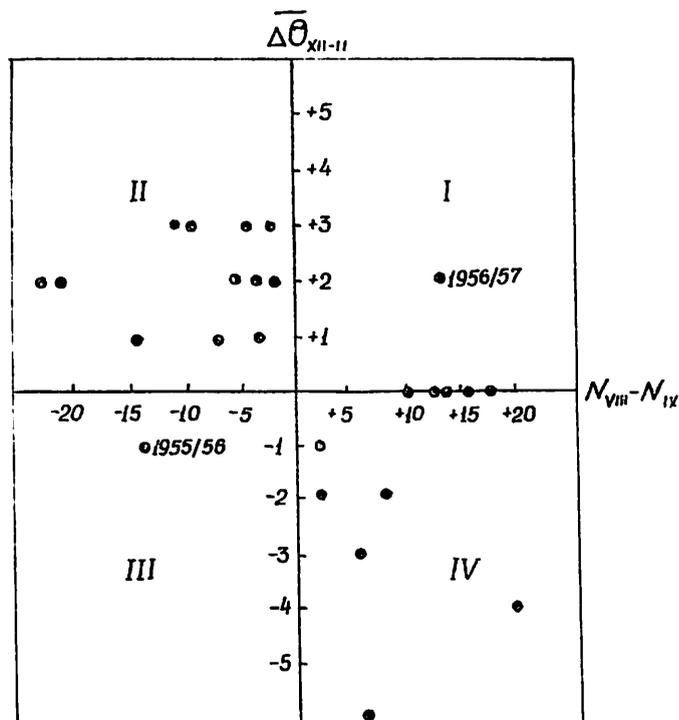


Рис.3. Зависимость аномалии средней температуры воздуха зимнего сезона ( $\overline{\Delta\theta}_{XII-I}$ ) от преобразования циркуляции от августа к сентябрю ( $N_{VIII} - N_{IX}$ ).  
Возле точек в I и III квадрантах - годы.

В результате исследования установлено (рис.3), что при положительной разности показателей комплекса синоптических процессов  $N$  августа и сентября следует ожидать холодную или близкую к норме зиму [ $\overline{\Delta\theta}_{XII-I} \leq 0$ ], при отрицательной разности - теплую зиму [ $\overline{\Delta\theta}_{XII-I} > 0$ ]. Обеспеченность указанных признаков равна соответственно 92 и 86%.

Исходя из этого и учитывая, что между величинами  $\overline{\Delta\theta}_{XII-I}$  и продолжительностью ледостава в низовьях Дуная существует достаточно тесная связь (индекс корреляции этой связи 0,9), знак разности  $N_{VIII} - N_{IX}$  с определенной вероятностью может служить прогностическим признаком для составления качественного прогноза продолжительности ледостава на советском участке Дуная.

Задачей дальнейших исследований является уточнение локальных зависимостей для определения начала ледостава по мере накопления исходной гидрометеорологической информации и разработка методов предсказания сроков установления ледостава в низовьях Дуная на основе изучения характера атмосферных процессов.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Анискина Н.А.,  
Ляпунова И.Б. 0 прогнозе суровости зимы в Центральной Европе. - Труды ГГИ, 1972, вып.197.
2. Вагин Н.Ф. Закономерности ледовых процессов в дельтах (на примере устья Дуная). - Сб.работ Киевской ГМО, 1971, вып.7.
3. аноним Гидрология устьевой области Дуная. М., Гидрометеоиздат, 1963.

4. аноним  
Доклад о ледовом режиме р. Дунай.  
Дунайская комиссия. Будапешт, 1967.
5. Кац А. Л.  
Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы. Л., Гидрометеиздат, 1960.
6. Коверный И. Л.  
Вопросы долгосрочных прогнозов ледовых явлений на реке Дунай. IV-я Конференция придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Братислава, 1967.
7. Комаров В. Д.  
К вопросу краткосрочного прогноза ледостава на крупных реках. - Труды ЦИП, 1947, вып. 4 (31).
8. Макаревич Т. Н.,  
Ефимова З. А.  
Характерные черты осенне-зимнего ледового режима р. Дуная. - Труды ГГИ, 1962, вып. 80.
9. Макаревич Т. Н.,  
Ефимова З. А.,  
Савина Л. К.  
Долгосрочный прогноз продолжительности ледовых явлений на р. Дунае. - Труды ГГИ, 1972, вып. 197.
10. Мицэ П.  
Возможности предвидения и эволюции ледостава на Нижнем Дунае. - Сб. докладов V Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Белград, 1970.
11. Солопенко Л. И.  
Циркуляционные условия ледообразования на советском участке Дуная. - Труды УкрНИГМИ, 1970, вып. 97.
12. Стэнеску В.  
Прогноз в период ледовых явлений. III-я Конференция придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Бухарест, 1965.
13. Шуляковский Л. Г.  
О расчете начала ледостава на реках для целей краткосрочного прогноза. - Труды ЦИП, 1955, вып. 40(67).
14. Шуляковский Л. Г.  
Появление льда и начало ледостава на реках, озерах и водохранилищах. М., Гидрометеиздат, 1960.
15. Щербак А. В.,  
Солопенко Л. И.  
Осенне-зимний ледовый режим советского участка р. Дуная. Труды УкрНИГМИ, 1970, вып. 97.
16. Щербак А. В.,  
Солопенко Л. И.  
Исследование условий ледообразования и прогноза появления льда на советском участке Дуная. - Сб. докладов VI Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Киев, 1972.
17. Щербак А. В.,  
Солопенко Л. И.  
Условия формирования заторно-зажорных явлений в низовьях Дуная. - Труды УкрНИГМИ, 1972, вып. 116.
18. аноним  
Dunarea între Bazias si Ceatal Izmail. Monografie hidrologica. Bucuresti, 1967.
19. Mirica Gh.  
Regimul gheturilor din Delta Dunarii. Meteorologia, hidrologia si gospodaria apelor. Nr. 2-3, Bucuresti, 1958.
20. Stan M.  
Prognoze ale fenomenelor de inget pe Dunare. Studii de Hidrologie. Bucuresti, 1962.

РАСЧЕТЫ И ПРОГНОЗЫ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА ДЛЯ  
ЦЕЛЕЙ ПРОДЛЕНИЯ НАВИГАЦИИ

Аmineва В.Я., Балашова И.В., Гинзбург Б.М., Пономарев М.Б.

BERECHNUNG UND VORHERSAGE DER EISDICKE ZUM  
ZWECHE EINER VERLÄNGERUNG DER NAVIGATIONSPERIODE

Amineva V.Ja., Balašova I.V., Ginzburg B.M., Ponomarev M.B.

Резюме

Предлагается методика расчета нарастания льда на реках и водохранилищах. С ее помощью выполнены расчеты для Нижнего Дуная и водохранилища Джердап. Показана возможность использования вероятностных характеристик и прогноза сроков нарастания льда до заданных величин толщины для целей продления навигации.

Zusammenfassung

Es wird eine Berechnungsmethode des Eisdeckenwachstums in Flüssen und Stauräumen vorgeschlagen. Die Berechnungen des Eisdeckenwachstums sind für die Untere Donau und den Stauraum Djerdap (Eisernes Tor) nach der vorgeschlagenen Methode durchgeführt. Es wird gezeigt, wie die Wahrscheinlichkeit des Auftretens vorgegebener Eisdicken und deren Zeitpunkt des Eintretens zum Zwecke einer Verlängerung der Schifffahrtsperiode berechnet werden können.

Расчеты и прогнозы толщины ледяного покрова на реках и водохранилищах привлекают все большее внимание как в связи с увеличением возможностей работы флота во льду, так и вследствие расширения различных работ и движения транспорта на льду. Особенно, в частности, важны расчеты для новых водохранилищ, где нет достаточных рядов наблюдений.

Методы таких расчетов предложены в последние годы профессорами Л.Г.Шуляковским (12, 4) и В.В.Пиотревичем (9, 10). Оба они основаны на приближенном интегрировании уравнения типа Стефана-Девика, но по первому методу расчет выполняется с подробным учетом составляющих теплообмена льда через нижнюю поверхность, что особенно важно в начальный период замерзания водохранилищ, особенно на проточных участках, а второй позволяет вести расчет для рек, и малопроточных водохранилищ, причем лучшие результаты получаются для толщин льда, превышающих 20 см.

Расчетная формула Шуляковского имеет вид:

$$h_{\lambda} = \frac{\lambda_{\lambda}}{k_{\lambda}} - \frac{\lambda_{\lambda} h_c}{\lambda_c} + \sqrt{\left(\frac{h_{\lambda}}{k_{\lambda}} + h_0 + \frac{\lambda_{\lambda} h_c}{\lambda_c}\right)^2 - \frac{2\lambda_{\lambda}(\theta + \frac{d_{\lambda}}{k_{\lambda}})\tau}{L\rho_{\lambda}} - \frac{\tau \sum q_n}{L\rho_{\lambda}}} \quad [1]$$

где  $h_{\lambda}$  - толщина ледяного покрова;  $\lambda_{\lambda}$  и  $\lambda_c$  - коэффициенты теплопроводности льда и снега;  $k_{\lambda}$  - коэффициент теплообмена на поверхности снежно-ледяного покрова;  $d_{\lambda}$  - удельная теплоотдача этой поверхности;  $h_c$  - высота слоя снега на льду;  $h_0$  - начальная толщина льда;  $\theta$  - температура воздуха;  $\tau$  - время в сутках;  $L$  - теплота ледообразования;  $\rho_{\lambda}$  - плотность льда;  $q_n$  - теплоприход к нижней поверхности льда.

Величина  $q_n$  определяется в зависимости от начальной температуры воды, скорости течения, глубины, притока тепла от ложа водохранилища и поступления солнечной радиации через снежно-ледяной покров.

Элементы теплообмена, необходимые для вычисления величин  $k_{\lambda}$  и  $d_{\lambda}$  определяются по известным формулам Шуляковского (11, 13), применительно к температуре снежно-ледяной поверхнос-

ти  $\bar{d}_n$ . Последняя же зависит в свою очередь от  $K_d$  и  $d_d$ , поэтому расчет выполняется подбором (методом последовательных приближений), который наиболее быстро осуществляется на ЭВМ по специальной программе (7).

По этому методу рассчитаны ежедневные толщины льда на Куйбышевском водохранилище, замерзание которого лимитирует осеннюю транзитную навигацию на Волге. Вероятная погрешность расчета - около 2 см вполне сопоставима с точностью измерения толщины льда.

Расчеты нарастания льда применительно к условиям водохранилища за 32 года (7) показали, что в среднем толщина льда достигает 10 см через 7 дней, 15 см - через 10 дней и 20 см - через 17 дней после начала ледостава. При этом лишь однажды за 10 лет толщина льда может достичь 20 см в среднюю дату начала ледостава и один раз в четыре года - на 10 дней позже этой даты.

Поскольку расчет дает среднюю толщину льда на участке, исследована по материалам подробных ледосъемок изменчивость толщины льда по акватории. Она оказалась довольно значительной: коэффициент вариации в среднем для верхней части Куйбышевского водохранилища составляет 0,20, от зимы к зиме он колеблется от 0,11 до 0,37, но в течение одной зимы сохраняет свое значение. На толщину льда влияет глубина водохранилища - на глубоководных участках, особенно вдоль затопленного русла реки, толщина льда меньше, на мелководьях - больше.

Поскольку для судоходства важна толщина льда вдоль фарватера, были выбраны измерения, сделанные в точках, где глубина превышает 10 м. Оказалось, что средняя толщина льда здесь почти на 20% меньше, чем по всей акватории, а коэффициент вариации - тот же. Подробный анализ показал, что если средняя толщина льда на участке водохранилища составляет 20 см, то на фарватере такая и большая толщина льда будет наблюдаться только на 15-20% его протяжения, а толщина льда более 25-30 см - лишь на 1-2%.

Из практики последних лет известно, что движение наиболее мощных самоходных судов продолжается до наступления толщины льда 15-20 см. Видимо, продление навигации с помощью имеющихся речных ледоколов позволит продолжать перевозки грузов также только при такой толщине льда, так как с ее превышением скорость движения ледокола быстро уменьшается, а при толщине льда более 30 см ледоколы продвигаются уже очень медленно. Поэтому период нарастания толщины льда от 20 до 30 см может быть использован лишь для вывода судов к местам зимовки.

На основе полученных кривых обеспеченности сроков наступления толщин льда 10, 15, 20 см и толщин льда на разные календарные сроки в настоящее время ведется экономический расчет, который позволит определить оптимальные сроки, до которых целесообразно гарантировать доставку грузов в порты Средней Волги. Однако по гидрологическим условиям можно считать, что продление регулярной навигации примерно на 10 дней после средних сроков начала ледостава на Куйбышевском водохранилище - дело вполне реальное.

Получив многолетние ряды рассчитанных дат нарастания льда до толщины 10, 15, 20 см, мы выявили возможность применения для долгосрочных прогнозов этих дат методики, разработанной ранее для долгосрочного прогноза сроков начала ледостава на волжских водохранилищах (6). Основы этой методики докладывались на нашей IV конференции (13). Она позволяет давать прогноз начала ледостава в начале октября с заблаговременностью 1-2 месяца. Для дат нарастания льда до толщины 10-20 см заблаговременность прогноза увеличивается, а точность остается удовлетворительной. Особенно важно то, что методика практически исключает возможность неожиданного нарастания толщины льда до 20 см существенно раньше намеченного нами гарантийного срока продления навигации. В двух третях случаев позднего нарастания льда такая

задержка предусматривается прогнозами и может быть заранее подготовлено ее использование для дополнительных перевозок грузов.

В настоящее время работа по расчету и прогнозу нарастания льда ведется для остальных водохранилищ Волжско-камского каскада. Для различных объектов расчеты выполняются как по методу Шуляковского, так и по методу Пиотровича. Второй метод основан на разделении периода, за которой ведется расчет, на интервалы, в течение которых процесс можно считать стационарным. Границами интервалов являются дни значительных снегопадов, оттепелей, сильных ветров, когда резко изменяется теплопроводность снежного покрова. В течение каждого интервала продолжительностью  $\Delta T$  суток нарастание льда ( $\Delta h_\lambda$ ) определяется по формуле:

$$\alpha \rho_\lambda (1 - K_\omega) \Delta h_\lambda = - \frac{\eta \lambda_\lambda \Theta \Delta T}{h_0 + \frac{\lambda_\lambda}{\lambda_c} h} \quad [2]$$

где  $K_\omega$  - концентрация шуги;  $\eta$  - переходный коэффициент от температуры воздуха на метеостанции к температуре снежно-ледяной поверхности.

Для шугоносных рек величина  $K_\omega$  может быть принята равной 0,30; величина определяется с помощью эмпирической зависимости, связывающей ее с толщиной снежно-ледяного покрова, скоростью ветра и облачностью. К полученной по формуле [2] величине  $\Delta h_\lambda$  вносятся две поправки: на приток тепла от ложа реки и от солнечной радиации. Первая определяется по графику Булатова-Браславского (5), вторая по формуле:

$$\delta h_\lambda = \frac{0,00424 Q(1 - A)}{h_\Sigma(0,116 + 0,0043\omega) + 0,312} \quad [3]$$

Здесь  $Q$  - падающая на лед (снег) суммарная солнечная радиация в кал/сутки  $\text{см}^2$  (с учетом влияния облачности);  $h_\Sigma = h_\lambda + \frac{\lambda_\lambda}{\lambda_c} h_c$ ;  $\omega$  - скорость ветра в м/с;  $A$  - альbedo снежно-ледяной поверхности, принятое для снега равным 75%, для шугового льда 40%, для кристаллического - 20%.

Расчет для рек начинается с момента начала ледохода или шугохода. Таким образом учитывается начальная толщина льда к моменту образования сплошного ледяного покрова. Высота снега на льду определяется по данным об осадках, выпавших на ближайшей репрезентативной метеостанции, а плотность снежного покрова - по зависимости ее от скорости ветра. Учитывается также и влияние оттепелей на высоту снежного покрова на льду.

Предложена также простая формула для расчета слоя снежного льда ( $h_{c\lambda}$ ), образующегося при выходе воды на лед через трещины или лунки при перегрузке его снегом, от капиллярного поднятия воды снегом или при таянии снега во время оттепелей [1]:

$$h_{c\lambda} = 0,62 (h_n - h_c) \quad [4]$$

где  $h_n$  - высота снега в поле на репрезентативной метеостанции,  $h_c$  - высота снега на льду по наблюдениям водомерного поста.

Расчет выполняется, как упомянуто выше, по интервалам, причем толщина льда, полученная по расчету на конец первого интервала принимается за начальную для следующего и т.д.

Описанная методика расчета толщины льда успешно применена как для малопроточных участков водохранилищ (10), так и для рек Европейской территории Советского Союза и Средней Азии (2). Для всех этих разнообразных объектов рассчитанные толщины льда оказались близкими к средней толщине льда, определенной по данным ледомерных съемок. Так, в частности, для Средней Азии, где условия нарастания льда наиболее сложны, вероятная погрешность расче-

тов составила 2,5 см. Таким образом, мы располагаем в настоящее время методами, позволяющими рассчитывать достаточно точно толщину льда как на речных, так и на зарегулированных участках Дуная. Такие расчеты необходимы, во-первых, в связи с недостаточностью наблюдений толщины льда на реке и, во-вторых, чтобы получить более полное представление о ледовом режиме водохранилища, созданного гидроузлом у Железных Ворот (Джердап). Кроме режимных сведений, выполнение таких расчетов позволило бы обеспечить в дальнейшем выпуск на их основе краткосрочных прогнозов нарастания льда и разработать методику долгосрочных прогнозов.

Поэтому мы в качестве примера прежде всего рассчитали сроки появления льда и начала ледостава, а также нарастание толщины ледяного покрова на водохранилище Джердап. Расчеты были выполнены для участка, где ледостав образуется раньше всего. Из анализа распределения глубин и скоростей течения мы установили, что такой участок расположен м/у устьем Моравы (Смедерево) и Дренковой. Этот же участок указывает и В.Милорадова (14). По наличию данных гидрологических и метеорологических наблюдений оказалось возможным сделать расчеты для десяти зим, с 1962-63 по 1971-72 гг.

Средние характеристики суровости зим и продолжительности ледовых явлений за это десятилетие близки к средним многолетним, (3, 8) поэтому полученные результаты можно считать показательными.

Сроки появления льда и начала ледостава рассчитаны по известному методу Л.Г.Шуляковского (11, 13). Оказалось, что водохранилище должно было замерзнуть в пяти случаях - в зимы 1962-63, 63-64, 65-66, 68-69, 71-72 гг. В 1971-72 гг., когда водохранилище было уже частично наполнено, дата ледостава по расчету совпала с наблюдаемой у Дренково. В остальные годы река у Дренково не замерзла, а у Смедерево ледостав был отмечен только в зимы 1962-63 и 63-64 гг. Таким образом, ледостав на водохранилище будет возникать значительно чаще, чем на том же участке реки в естественных условиях.

Рассчитанная максимальная толщина льда в четырех случаях из пяти не превысила 20 см и лишь однажды (зима 1962-63 гг.) достигла 30 см. Следовательно, можно полагать, что, несмотря на более частое замерзание, серьезные трудности для навигации на водохранилище гидроузла Джердап будут возникать лишь в одну из десяти зим, (разумеется, если будет обеспечена ледокольная помощь движению судов).

В качестве второго примера была рассчитана толщина льда на нижнем, советском участке Дуная за те же десять зим. Устойчивый ледостав и на этом участке был в пяти из них; 1962-63, 1963-64, 66-67, 68-69, 71-72.

Расчетная формула [2] после подстановки постоянных величин преобразуется к виду:

$$\Delta h_{\lambda} = - \frac{7,5 n \sum \Theta}{h_0 + \frac{\lambda_{\lambda}}{\lambda_c} h_c} \quad [5]$$

Здесь  $\sum \Theta$  - сумма средних суточных величин температуры воздуха за расчетный интервал времени. Концентрация шуги принята  $K_{ш} = 0,18$ , т.е. средняя из полученных для наиболее шугоносных (Ангара, реки Средней Азии) и нешугоносных рек.

Рассчитанные толщины льда были сопоставлены со средними из наблюдаемых в соответствующие сроки на водомерных постах Рени, Измаил, Килия, Вилково. Вероятная погрешность расчета составила 1,2 см. Наибольшая толщина льда за зиму на этом участке в четырех случаях была близка к 20 см, а зимой 1962-63 гг. достигла 36 см. В эту зиму толщина льда 20 см и более

сохранялась немного больше 10 дней, в остальных случаях - около пяти дней. Следовательно, и на этом участке Дуная существенные затруднения для навигации (с ледокольной помощью) могут возникать лишь примерно раз в десять лет.

Приведенные примеры расчетов выполнены по недостаточно подробным исходным данным и за не-большой ряд лет, в который, в частности, не вошли самые суровые на Дунае зимы 1928-29, 39-40, 41-42, 46-47, 53-54 гг. Мы осуществили их с целью показать пути и возможности решения задачи гидрологического обоснования предложений по обеспечению регулярной кругло-годовой навигации на Дунае. Необходимо продолжить исследование, а это возможно лишь при совместной работе гидрологов придунайских стран.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Аминева В.Я. Опыт расчета толщины снежного льда на реках Европейской территории Союза. Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып. 112, с. 90-99.
2. Аминева В.Я. Расчет нарастания толщины льда с учетом его структуры. Труды Гидрометцентра СССР, 1974, вып. 117, с. 20-38.
3. Анискина Н.А., Ляпунова И.Б. О прогнозе суровости зимы в Центральной Европе. Труды ГГИ, 1972, вып. 197, с. 25-51.
4. Андрианова Г.А., Бусурина В.М. Расчет толщины ледяного покрова в начальный период ледостава на примере двух волжских водохранилищ. Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып. 112, с. 64-76.
5. Булатов С.Н. О расчете притока тепла к нижней поверхности ледяного покрова водохранилищ зимой. Труды Гидрометцентра СССР, 1968, вып. 17, с. 38-45.
6. Гинзбург Б.М., Антипова Е.Г., Балашова И.В. Методика прогнозов начала ледостава на водохранилищах волжского каскада ГЭС. Труды Гидрометцентра СССР, 1968, вып. 17, с. 3-19.
7. Гинзбург Б.М., Балашова И.В., Пономарев М.Б. О расчетах и прогнозах нарастания льда на волжских водохранилищах для целей продления навигации. Труды Гидрометцентра СССР, 1975, вып. 140.
8. Макаревич Т.Н., Ефимова З.А., Савина Л.К. Долгосрочный прогноз продолжительности ледовых явлений на р. Дунае. Труды ГГИ, 1972, вып. 197, с. 3-24.
9. Пиотрович В.В. Методика расчета максимальной толщины льда на водохранилищах. Труды ЦИП, 1963, вып. 130, с. 85.
10. Пиотрович В.В. Расчеты толщины ледяного покрова на водохранилищах по метеорологическим элементам. Труды Гидрометцентра СССР, 1968, вып. 18, с. 136.
11. Шуляковский Л.Г. Появление льда и начало ледостава на реках, озерах и водохранилищах. Гидрометеиздат, М., 1960, с. 216.
12. Шуляковский Л.Г. К методике расчета толщины ледяного покрова на водохранилищах. Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып. 112, с. 50-63.
13. Шуляковский Л.Г., Балашова И.В., Гинзбург Б.М. Прогнозы замерзания вновь создаваемых речных водохранилищ. Труды IV Конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Белград, 1967, с. 151-158.
14. Miloradov V. Promene u režimu nanosa leda na Dunava i pritokama pod uticajem sistema "Djerdap". Savatavanje o uticaju izgradnje hidroenergetskog i plovidbenog sistema "Djerdap" na razvoj privrede sr Srbije. Beograd, maja 1971, s. 213-235.



ПРОГНОЗЫ УМЕНЬШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА И ВСКРЫТИЯ РЕК

Булатов С.Н., Полякова К.Н., Тимченко В.М.

VORHERSAGEN DER FESTIGKEITSABNAHME DES FLUSSEISES  
UND DES EISGANGES

Bulatov S.N., Poljakova K.N., Timčenko V.M.

Резюме

Изложены основы метода расчета уменьшения толщины и прочности льда в период таяния и показана возможность применения его к прогнозу вскрытия рек и дат наступления заданной прочности льда на водохранилищах.

Zusammenfassung

Die moderne Binnenschifffahrt auf Flüssen und Stauräumen ist unter Einsatz von Eisbrechern schon vor dem natürlichen Eisabgang möglich. Eine wirtschaftliche Geschwindigkeit der Schifffahrt unter Eisbrechereinsatz ist jedoch erst von einer bestimmten Festigkeitsabnahme der Eisdicke möglich. Auf der Grundlage der im Hydrometeorologischen Zentrum der UdSSR durchgeführten Untersuchungen wurde die Möglichkeit einer Vorhersage für verschiedene Vorhersagezeiträume von Daten des Auftretens der oben erwähnten Eisfestigkeit gezeigt und ein Modell der Vorhersage des Eisganges in Flüssen erhalten.

Der Eisgang erfolgt dann, wenn die Bedingung

$$\varphi \cdot h \leq f(D) \quad [1]$$

erfüllt wird; wo:  $\varphi$  - relative Eisfestigkeit,  $h$  = Dicke der schmelzenden Eisdecke,  $D$  = zusätzlicher Strömungswiderstand des Wassers durch die Eisdecke.

Der Komplex  $\varphi \cdot h$  wird durch den Grad des Wärmeeinflusses der Umgebung auf die Eisdecke bestimmt und kann berechnet werden. Index  $D$  ist der Wert des Wasserstandes oder dessen Anstiegs zur Zeit des Eisganges (Eisstau). Der rechte Teil der Ungleichung [1] wird für eine konkrete Flußstrecke nach den Beobachtungsangaben für vergangene Jahre bestimmt.

Die Vorhersage des Eisganges besteht in der Vorausberechnung von  $\varphi \cdot h$  und des Wasserstandes.

Die Vorausberechnung des Wasserstandes wird mittels empirischer Verfahren durchgeführt. Die Grundlage dieser Verfahren bildet die Berücksichtigung der regionalen hydrometeorologischen und hydrodynamischen Bedingungen.

Die Prüfung der Vorhersagemethoden an Flüssen des Fernen Ostens (Fernöstliches wissenschaftliches hydrometeorologisches Forschungsinstitut) und anderen Flüssen der UdSSR hat eine hohe Genauigkeit dieser Methoden ergeben.

Die Methode kann für verschiedene Flüsse und im einzelnen auch für die Donau angewandt werden.

Вскрытие рек и начало дрейфа льда на водохранилищах происходит под воздействием двух факторов - теплового и механического. В зависимости от особенностей режима водоема относительная роль этих факторов во вскрытии может быть различной.

Начало дрейфа льда на водохранилищах и очищение их ото льда происходит позже, чем вскрытие примыкающих к ним участков рек. Это лимитирует начало транзитного судоходства и задерживает навигацию на временно судоходных реках, впадающих в водохранилища. Однако, современные речные и озерные суда способны плавать во льдах и даже прокладывать себе путь в ослабленном таянием сплошном ледяном покрове. Такие суда не приспособлены к самостоятельному плаванию во льдах и не могут в них маневрировать, но они свободно идут в кильватере за ледоколом или в проделанном ранее ледоколом канале во льду.

Таким образом, при решении задачи продления сроков навигации расчет и прогноз прочности тающего ледяного покрова приобретает первостепенное значение. Кроме того, оценка прочности тающего ледяного покрова представляет интерес при определении времени прекращения эксплуатации ледяных дорог и переправ, при борьбе с весенними заторами льда на реках, при расчетах ледозащитных сооружений и, разумеется, при расчете и прогнозе весенних ледовых явлений на реках и водохранилищах.

Главным видом деформации, которой подвергается ледяной покров, является изгиб (излом). Ледяной покров работает на изгиб под влиянием воды, ветра, под тяжестью автомашин, ледоколов и судов. Величина разрушающего напряжения на изгиб постепенно уменьшается по мере таяния. Уменьшение разрушающего напряжения на изгиб рассматривается в зависимости от теплообмена с атмосферой и грунтом, и как следствие таяния льда и увеличения его пористости. Однако, величина разрушающего напряжения зависит не только от пористости, но и от силы межкристаллических связей кристаллов льда, которые зависят от воздействия солнечной радиации. Солнечная радиация воздействует на лед во всей его толще, разрушает его изнутри, образуя в нем жидкие вкрапления и прослойки. Наличие жидкой фазы в тающем льде является основной причиной уменьшения его прочности.

Значительные успехи достигнуты за последнее время в области расчетов таяния и разрушения ледяного покрова. С.Н.Булатовым разработан физически обоснованный метод расчета уменьшения толщины и прочности тающего льда. Содержание этого метода подробно изложено в работах автора (1, 2). Суть его состоит в том, что за каждый день, начиная с момента схода снега, вычисляется по данным метеорологических и гидрологических наблюдений толщина слоя льда, ставшего с верхней и нижней поверхностями ледяного покрова, а также количество тепла солнечной радиации, поглощенное остающейся массой льда. Последнее определяет нарушение кристаллической структуры льда, приводящее к снижению его прочности. Относительное разрушающее напряжение на изгиб  $\varphi$  определяется по формуле:

$$\varphi = \left( 1 - \sqrt{\frac{S}{S_0}} \right)^2 \quad [1]$$

где  $S$  - содержание жидкой фазы, выраженное затраченным на ее образование количеством тепла солнечной радиации, поглощенного льдом (кал/см<sup>3</sup>);  $S_0$  - количество тепла солнечной радиации, при поглощении которого лед полностью теряет прочность. По экспериментальным данным  $S_0 = 44,5$  кал/см<sup>3</sup>.

Разрушение ледяного покрова рек и водохранилищ весной происходит с одной стороны, вследствие потери прочности ледяного покрова и уменьшения его толщины в результате поступающего тепла, а с другой стороны под воздействием на ледяной покров (на реках) подъема уровня воды или (на водохранилищах) под воздействием ветра.

Условия начала разрушения ледяного покрова выражаются следующими неравенствами:

$$\varphi h \leq f(\Delta H, H) \quad [2]$$

$$\varphi h \leq f(W^2) \quad [3]$$

где  $\varphi$  - относительное разрушающее напряжение тающего льда на изгиб;  $h$  - толщина льда ко времени вскрытия;  $H$  - уровень воды при вскрытии;  $\Delta H$  - подъем уровня воды к времени вскрытия над некоторым уровнем, например, над максимальным зимним уровнем, или над минимальным предподъемным;  $W^2$  - скорость ветра.

Уровень воды  $H$  косвенно определяет силу трения потока о нижнюю поверхность ледяного покрова, а подъем уровня воды определяет свободу движения полосы льда, отделенной от берегов.

Величины  $H$  и  $\Delta H$  являются локальными показателями влекующей силы потока, и не только потому, что зависимость между скоростью течения и высотой уровня воды локальна и не однозначна, но и главным образом потому, что концентрация влекующей силы потока, как показал Шуляковский (7), происходит на полосе ледяного покрова, заключенной между двумя соседствующими поворотами русла. Длина этой полосы не зависит от уровня воды или скорости течения, а только от совокупности морфологических характеристик, свойственных конкретному участку реки. Таким образом, зависимость [2], полученная для определенного участка реки, будет отличаться от зависимости, полученной для другого участка. Однако принцип получения зависимости для любой реки общий и в этом смысле метод универсален.

Выявленные для ряда рек, расположенных в разных физико-географических районах СССР, зависимости между показателем прочности ледяного покрова  $\varphi h$  и характеристикой механической силы потока в момент вскрытия  $H$  или  $\Delta H$  имеют высокую обеспеченность и могут быть использованы для прогноза времени вскрытия (3). Аналитически эти зависимости описываются уравнением квадратической параболы вида:

$$\varphi h \leq a + b \left( \frac{D}{100} + c \right)^2 \quad [4]$$

В этом уравнении:  $D$  - одно из значений аргумента ( $H$  или  $\Delta H$ );  $a$ ,  $b$  и  $c$  - параметры, определяющие положение кривой и учитывающие относительность значений уровня воды.

Полученное для конкретного створа условие [4] может использоваться для расчета и прогноза сроков вскрытия реки на этом участке. Расчет дат вскрытия при этом сводится к вычислению значений произведения  $\varphi h$  на каждый день периода таяния льда и проверке, с учетом известных значений уровня воды, выполнимости условия [4]. Первый день, когда это условие выполняется, принимается за дату вскрытия. Для прогноза сроков вскрытия необходим прогноз прочности ледяного покрова и прогноз уровня воды. Первый возможен лишь в том случае, когда нам известны предвычисленные величины соответствующих метеорологических элементов (температура и влажность воздуха, скорость ветра и облачность) на каждый день периода заблаговременности. Однако выпускаемые в настоящее время метеорологические прогнозы, к сожалению, как правило, не имеют достаточной точности и заблаговременности, а часть необходимых для расчета метеоэлементов вообще не прогнозируется. Это вынуждает к поиску других способов предвычисления  $\varphi h$ .

Установлено [6], что для некоторых рек произведение  $\varphi h$  зависит от числа дней таяния  $n$  и от толщины ледяного покрова в первый день таяния  $h_0$ , т.е. в первый день после схода снега с ледяного покрова. Аппроксимируется эта зависимость уравнением

$$\varphi h = h_0 \left( 1 - \sqrt{\frac{n}{ah_0}} \right)^2 \quad [5]$$

где  $a$  - некоторый постоянный (размерный) коэффициент, который находится эмпирически для различных физико-географических районов. Для рек Дальнего Востока, например, этот коэффициент установлен равным 0,32.

Итак, пользуясь зависимостью [5], можно в первый же день после схода постоянного снежного покрова со льда составить прогноз уменьшения прочности ледяного покрова с заданной заблаговременностью.

Необходимо все же отметить, что уравнение [5] является типовым, в отдельных же случаях происходят резкие потепления или похолодания, приводящие к заметным отклонениям хода уменьшения прочности ледяного покрова от рассчитанного по этому уравнению. Такие аномальные периоды, как правило, кратковременны, однако они оказывают влияние на дальнейший ход изменения прочности ледяного покрова.

В связи с этим разработан способ уточнения прогноза прочности ледяного покрова, который учитывает влияние аномальных условий, имевших место до составления уточнения. Произведение  $\varphi h$  на день составления уточненного прогноза принимается равным его величине, рассчитанной по фактическим данным методом Булатова. Затем определяется условное (расчетное) число дней таяния  $n_p$  по формуле

$$n_p = a \left( \sqrt{h_0} - \sqrt{(\varphi h)_t} \right)^2 \quad [6]$$

где  $(\varphi h)_t$  - рассчитанная прочность ледяного покрова на день составления прогноза. Практически  $n_p$  представляет собой то число дней таяния, при котором прочность ледяного покрова, если бы она изменялась по типовому ходу, достигла в день составления прогноза значения, равного полученному расчетом по фактическим данным. Затем на период заблаговременности прогноза предполагается типовой ход уменьшения прочности ледяного покрова и поэтому расчетное уравнение принимает вид:

$$(\varphi h)_{t+\tau} = h_0 \left( 1 - \sqrt{\frac{n_p + \tau}{ah_0}} \right)^2 \quad [7]$$

где  $(\varphi h)_{t+\tau}$  - предвычисляемая с заблаговременностью  $\tau$  прочность льда.

Проверочные прогнозы для Усури, Амура и Зеи показали, что указанное уточнение прогноза прочности существенным образом повышает эффективность методики прогноза сроков вскрытия.

Нужно признать, что прогнозирование уровня воды на реках перед вскрытием представляет собой наиболее слабое звено в общей цепи решения задачи прогнозирования сроков вскрытия рек с использованием данных о прочности ледяного покрова. Именно из-за этого точность прогнозов по указанному способу еще не достигает своего максимального значения. При средней заблаговременности прогноза 5-6 суток, обеспеченность погрешности, не превышающей допустимой составляет 85-95%.

Составление прогноза вскрытия производится по следующей схеме. Вначале определяется дата начала таяния льда. За первый день таяния льда принимается день, следующий за датой схода снега. Последняя рассчитывается. Затем последовательно день за днем с возможной заблаговременностью прогнозируется высота уровня воды и по уравнению [7] предвычисляется прочность ледяного покрова  $\varphi h$ . За дату вскрытия принимается та, в которую комплекс  $\varphi h$  удовлетворяет условию  $\varphi h \leq f(H)$ .

Зависимости описанного типа построены для десяти пунктов на реках Усури, Зея и Амур. Все они используются для составления оперативных прогнозов вскрытия.

Предлагаемая модель как указывалось выше, применяется и для водохранилищ. Основным условием, обуславливающим взлом льда в этом случае является ветровой фактор.

Условия начала ветрового дрейфа льда на водохранилище выражается неравенством [3], в котором прочность ледяного покрова открытой части водохранилища сопоставляется с ветровым давлением на лед. Предполагается, что водохранилище имеет ширину, которая позволяет рассматривать ледяной покров как неограниченную плиту на упругом основании. Практически это означает, что ширина водохранилища должна быть не менее 2 км.

Неравенство по которому определяется начало дрейфа льда на водохранилищах имеет вид:

$$\varphi h^{1/2} \leq aw^2 \quad [8]$$

Здесь  $a$  - эмпирический размерный коэффициент,  $W$  - скорость ветра, наибольшая наблюдаемая за сутки. Для некоторых водохранилищ был получен коэффициент  $a = 0,018$

Для обеспечения продления навигации во льду необходимы расчеты и прогнозы уменьшения толщины и прочности льда.

Нами была сделана первая попытка расчета и прогноза прочностных характеристик ледяного покрова, при которых ледокол определенного класса может идти во льдах с заданной скоростью.

При движении во льдах, ледокол теряет часть своей скорости. Потеря скорости выражается разностью максимальной скорости ( $V_m$ ) и скорости движения во льдах ( $V$ ). Давление ледокола на ледяной покров пропорционально квадрату этой разности.

Как было выявлено Булатовым, давление производимое ледоколами для разрушения ледяного покрова пропорционально величине  $\varphi h$  и при работе ледокола в сплошном ледяном покрове соблюдается условие:

$$(V_m - V) = A \varphi h^{3/2} \quad [9]$$

Это уравнение является общим для всех типов ледоколов, но в зависимости от их ходовых качеств и мощности, которые определяются типом ледокола, величины  $V_m$  и  $A$  будут принимать свои значения.

Прочность льда ( $\varphi$ ) в большой степени зависит от метеорологических условий процесса таяния, первоначальной структуры льда и степени покрытости снегом. Вот почему первой нашей задачей было установление непосредственной связи толщины и прочности льда (которые мы умеем рассчитывать) со скоростью ледокола (5).

Для современных речных ледоколов уравнение [9] примет вид

$$(V_m - V)^2 = 1,4 \varphi h^{3/2} \quad [10]$$

Это уравнение дает возможность подойти к расчету оптимальных сроков начала движения судов во льду. Для характеристики режима и прогноза сроков наступления нового информативного элемента-прочности льда заданной величины, необходимо рассчитать прочностные характеристики  $\varphi$  и  $h$  за многолетний ряд.

Такой расчет выполнен для Волгоградского водохранилища за период его существования, т.е. с 1960 по 1972 гг.

Расчет таяния льда, т.е. вычисление  $\varphi$  и  $h$  на каждый день начинается с даты схода снега со льда. Эта дата определяется в свою очередь расчетом снега на льду по уравнению теплового баланса. Расчет таяния льда ведется послойно и осуществляется на ЭВМ. Для оценки прихода солнечной радиации к снегу или льду альбедо принималось постоянным, равным для снега 0,50, для льда 0,35. Толщина и прочность льда определялась на двух участках: один - в северной части водохранилища (Сосновка - Ахмат) и второй - в южной (район Камышина). Метеорологические данные для расчета взяты соответственно по метеостанциям Саратов и Камышин.

Известно, что метеорологические элементы воздушного потока, перемещающегося с суши трансформируются над водоемом. В настоящее время нет надежного метода учета такой трансформации, поэтому были использованы в расчетах поправки на трансформацию, полученные по результатам отдельных наблюдений за метеоэлементами на реках и водохранилищах, проведенных авторами (4).

Расчет толщины льда ( $h$ ) и относительного разрушающего напряжения ( $\varphi$ ) тающего ледяного покрова на Волгоградском водохранилище проведен за 13 лет. Результаты расчетов показывают, что в среднем интенсивная потеря прочности ледяного покрова начинается уже во второй половине марта, т.е. почти за месяц до очищения.

Этот расчет может быть применен для краткосрочного прогноза дат заданной прочности тающего ледяного покрова, если вместо фактических метеорологических данных использовать прогнозируемые.

Рассчитанные даты заданной прочности ледяного покрова ( $\varphi$ ) и соответствующие толщины льда за многолетний ряд используются в настоящее время для разработки методики долгосрочного прогноза.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Булатов С.Н. Расчет прочности тающего ледяного покрова и начала ветрового дрейфа льда. Труды Гидрометцентра СССР, 1970, вып.74, 117с.
2. Булатов С.Н. К расчету таяния ледяного покрова рек и водохранилищ. Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып.49, с. 14-29.
3. Булатов С.Н. О возможности создания универсального метода расчета времени вскрытия рек. Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып.112, с. 100-107.
4. Полякова К.Н. Особенности стаивания ледяного покрова и вскрытия средней Лены. Труды Центрального Института Прогнозов, вып. 151, 1965, с. 149-170.
5. Полякова К.Н. Возможность прогноза уменьшения прочности ледяного покрова весной на Волгоградском водохранилище для целей продления навигации. Труды Гидрометцентра СССР, 1975, вып.140, с.
6. Тимченко В.М. Прогноз сроков вскрытия р.Уссури на основе учета соотношения между механическим и тепловым факторами разрушения ледяного покрова.
7. Шуляковский Л.Г. К модели процесса вскрытия рек. Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып.49, с. 3-10.

## 9. DISKUSSION

### Ganz:

Eine kurze Frage zum Beitrag von Bulatow: Sind die Formeln durch theoretische Ableitung zustandegekommen oder empirisch durch Auswertung der Beobachtungen?

### Timtschenko:

Alle Formeln von Bulatow sind theoretisch auf der Grundlage sorgfältiger Analyse des physikalischen Wesens der Phänomene erarbeitet worden. Die Parameter der Formeln wurden am Ende der Bearbeitung eines großen empirischen und experimentellen Materials präzisiert.

### Schimunek:

Im Vortrag von Kretschmer wurde der Trend zu kalten Wintern aufgezeigt. Nach Heinz Haber geht aber eine säkulare Schwankung mit den Extremwintern in den 20er und 40er Jahren seit etwa 7 Jahren zu Ende. Klimatologen sagen eine Wetteränderung voraus.

Da für die Praxis (Techniker, Betriebsleute, Schifffahrt etc.) gegenteilige Prognosen wertlos sind, wird angefragt, ob die vorgetragene Prognose zu kalten Wintern aus einer Eigenstudie entwickelt wurde, oder ob sie mit Fachmeteorologen in Obereinstimmung erarbeitet wurde.

Der Anregung, durch Abwärmeeinleitungen in die Donau der Schifffahrt den Vorteil eisfreier Winter zu verschaffen, stehen schwere Bedenken von Chemikern, Biologen und Ökologen entgegen, die wesentlich größere Nachteile aufzeigen. (s. Limnologentagung Regensburg 14. - 20. September 1975 und Ökologentagung Wien).

Abwärme wird von dieser Arbeitsgruppe als Faktor "Wasserverschmutzung" betrachtet, wobei es - im Zusammenhang mit belastetem Wasser - zufolge erhöhten Sauerstoffbedarfs bei Temperaturerhöhungen zu Wasserqualitätsverschlechterung kommt. Faulgas- und - im Extremfall - Schwefelwasserstoffbildung würde Trinkwasser und Grundwasser beeinträchtigen. Zu befürchten sind anaerobe Verhältnisse, Nitrifikation, Erhöhung der Korrosion und allgemein eingeschränkte Wasserbenutzungsmöglichkeiten.

Dies führte zur Erstellung der "Wärmelastpläne", wobei internationale Grenzwerte von maximalem Wärmeeintrag  $+ 3^{\circ}\text{C}$  üblich sind, wenn die Flußtemperatur nicht mehr als  $25^{\circ}\text{C}$  (in Deutschland  $28^{\circ}\text{C}$ ) erreicht. Goda hat in diesem Zusammenhang angeregt, beim nächsten Kongreß ein Thema "Wärmeeinleitungen" aufzunehmen, da bereits heute 1/5 bis 1/6 des ungarischen Donauabflusses aus warmem Abwasser besteht.

Da die hier aufgezeigten Probleme und wissenschaftlichen Erkenntnisse jüngsten Datums sind, wird hier angefragt, ob über diesen Fragenkomplex mit den anderen Fachgruppen z.B. Limnologen, schon ein Kontaktgespräch geführt wurde, oder ob der vorliegende Vortrag schon vorher verfaßt wurde.

### Kretschmer:

Es mag sein, daß Heinz Haber Äußerungen getan hat, daß in Zukunft ein Trend zu mildereren Wintern bevorsteht. Meine Untersuchungen beziehen sich auf 5 zweihundertjährige Reihen, und das Ergebnis dieser Reihen ist in einer Eigenstudie veröffentlicht worden in der Zeitschrift "Wetter und Leben", der Zentralanstalt für Meteorologie in Wien, im Dezember-Heft 1974. Eine Fortsetzung - bezogen auf die letzten 4 Winter - ist z.Zt. im Druck. Diese Veröffentlichung und die jetzige wurde von der Meteorologischen Zentralanstalt kritisch bewertet; bei einem negativen Ergebnis wäre die Studie nicht veröffentlicht worden. Weltweit finden Sie in der Literatur immer wieder Hinweise, daß eine Tendenz zu kälteren Zeiten vorhanden ist. Ebenso finden sich Hinweise, daß das Gegenteil der Fall ist. Ich kann Ihnen nur sagen, warten Sie die nächsten Jahre ab, dann werden Sie sehen, wie der Trend weiter verläuft. Jedenfalls war die Periode 1828 - 1895 die kälteste Periode der neueren Zeit. Wie ich sagte, war das Verhältnis kalter Winter zum milden

1 : 3, in der neueren Zeit es es 1 : 7. 1895 - 1928/29 war eine außerordentlich warme Periode. Die 20er Jahre waren sehr mild. Nur Ende der 20er Jahre war der berühmte kalte Winter 1928/29; ein gleicher Winter war 1962/63. Das ist zu den Winterkälten zu bemerken.

Bezüglich der Wassertemperatur war vor etwa 6 Jahren eine Aufwärmspanne von + 5°C bei Kongressen genannt worden. In den letzten Jahren ist man zurückgegangen auf + 3°C, d.h., das Flußwasser kann nach der Durchmischung mit Abwärme um 3°C aufgeheizt werden. Man nennt das in Amerika "thermalpollution"; sie gilt als Vergiftung, wenn es mehr als 3°C sind. In Österreich ist die Grenze nicht 25°C, sondern es sind 29°C zugelassen worden (wenn nicht inzwischen eine Änderung vorgenommen wurde). Bei der Einleitung von Abwärme entstehen immer Wasserfahnen; eine zentrale Einleitung im Strom erfolgt z.Zt. nicht. Das hat zum Nachteil, daß beispielsweise bei Zwendendorf auf 60 - 80 m Breite eine Fahne am rechten Ufer sein wird; die Donau ist dort 300 m breit. Das sind alles beträchtliche Widersprüche. In einer interessanten biologischen Veröffentlichung wird gefordert, daß man nur 20°C Temperatur in einem Gewässer zulassen sollte, denn mit 20°C ist ein Lebensbereich von Lachsen, Forellen usw. abgeschlossen. Außerdem sollen auch gewisse Algen, die Futter für Fische sind, sehr beeinträchtigt werden, wenn die Temperatur höher als 20°C ist. Wir leben hier in einer Zeit des Umbruches. So wie man emotionell über die Kernkraftwerke unterschiedlich denkt, denkt man auch hinsichtlich der Wassertemperatur verschieden.

#### Täubert:

Die Ausführungen von Herrn Schimunek entsprechen m.E. nicht dem neuesten Kenntnisstand. Ich vertrete hier vielleicht auch die Meinung derjenigen, die die Mehrzwecknutzung der Flüsse einschließlich der Kühlwasser-einleitung betreiben müssen. Es gibt eine Reihe von Tatsachen, die den Feststellungen von Herrn Schimunek widersprechen. Man kann nicht davon ausgehen, daß eine Wärmeeinleitung als Verschmutzung angesehen werden muß. Der Sauerstoffhaushalt eines Gewässers wird durch Wärmeeinleitungen nicht unbedingt negativ beeinflusst, sondern nur dann, wenn er bereits durch anderweitige Verschmutzungen sehr in Anspruch genommen wird. Die Aufwärmspanne von 3°C, die diskutiert wird und die wieder angeführt wird, ist nicht naturwissenschaftlich exakt begründet. Sie werden niemanden finden, der Ihnen einen Grund nennen könnte, warum gerade 3°C Erwärmung überall stehen; dies ist ein Wert, der im Rahmen der LAWA-Arbeitsgruppe für den Rhein genannt wurde und die deshalb von allen anderen Ausschüssen übernommen wurde, da bisher keine naturwissenschaftliche Begründung vorlag. Ich kann als Beispiel erwähnen, daß an der Lippe eine wasserrechtliche Bewilligung vorliegt, nach der das Wasser um 15°C aufgewärmt werden darf. Hier haben sich keinerlei Schäden gezeigt. Eine Begutachtung des Fischbestandes zeigt, daß seit in Betriebnahme eines Kraftwerkes der Fischertrag von 100 kg pro ha auf 150 kg pro ha zugenommen hat. Die Aufwärmung ist dort bis auf 28°C erlaubt. Ich möchte diese Problematik hier nicht vertiefen, aber ich wollte ein kleines Gegengewicht gegen die bisherigen Ausführungen setzen.

#### Keller:

Die letzte Diskussion tangiert Gebiete, die bewußt nicht als Schwerpunkt des Programms der VIII. Konferenz, bzw. dieser Vorhersagekonferenz allgemein genannt wurden. Es bestehen natürlich Verbindungen zu dem Limnologen, die die Problematik der Wasserbeschaffenheit der Donau intensiv erforschen. Vor wenigen Tagen veranstaltete SIL an dieser Stelle eine Tagung über die Forschungen zur Wasserbeschaffenheit der Donau. Das heißt nicht, daß wir die Ergebnisse der Limnologen nicht berücksichtigen sollen. Auf der anderen Seite sind Vorhersagen der Wasserstände und des Abflusses für die Limnologen sehr wichtig. Die Problematik der Erhöhung der Wassertemperaturen durch Einleitungen dürfte jedem Hydrologen bekannt sein, jedoch sollten wir uns hier nur auf Aspekte konzentrieren, die für die Entwicklung der Vorhersage wichtig sind.

Die Auswirkungen der Klimaschwankungen auf hydrologische Prozesse sollten auf einer der nächsten Konferenzen behandelt werden, da sie grundlegend für Vorhersagen sind.

## 9. Д И С К У С С И Я

### Ганц:

Маленький вопрос к сообщению Булатова: Как были разработаны Ваши формулы? Теоретическим методом или эмпирически на основе наблюдений?

### Тимченко:

Все формулы С.Н.Булатова разработаны теоретически на основе тщательного анализа физической сущности явлений. Параметры формул уточнены в результате обработки большого эмпирического и экспериментального материала.

### Шимунек:

В докладе Кречмера был выявлен тренд для холодных зим. Согласно профессора Гейнца Габера вековые колебания с экстремальными зимами в двадцатых и сороковых годах закончились, однако, приблизительно 7 лет тому назад. Климатологи предсказывают изменение погоды.

Так как противоположные прогнозы для практики (техники, производственники, судоходство и т.д.) не имеют ценности, возникает вопрос, развивались ли доложенные прогнозы для холодных зим из собственных исследований, или они разработаны в согласовании со специалистами-метеорологами.

Мыслям о том, что вследствие введения в Дунай тепловых потерь от предприятий для судоходства создадутся благоприятные, свободные ото льда зимы, противостоят весомые размышления химиков, биологов и экологов, которые вскрывают значительно более существенные убытки. (См. конференцию лимнологов в Регенсбурге 14-20, сент. 1975 г. и конференцию экологов в Вене).

Тепловые потери рассматриваются этой рабочей группой как фактор загрязнения вод, которые, в контексте с нагруженной водой, вследствие повышенным потребностям в кислороде при повышении температуры, приводят к ухудшению качества воды. Образование болотного газа и - в экстремальном случае - образование сероводорода причинили бы вред питьевой и грунтовой воде. Опасения вызывают также анаэробные соотношения, нитрификация, повышение коррозии и всеобщее ограничение возможностей использования воды.

Это привело к составлению планов нагрузки тепловыми потерями, в которых интернациональная граница значений максимального введения тепловых потерь составляет  $+3^{\circ}\text{C}$ , если температура воды в реке не превышает  $25^{\circ}\text{C}$  (в Германии  $28^{\circ}\text{C}$ ). Годом затронул в связи с этим вопрос о том, чтобы на следующем конгрессе была принята тема "Тепловые введения", т.к. уже сегодня от 1/5 до 1/6 венгерских сточных вод Дуная является тепловыми потерями предприятий.

Так как вскрытые здесь проблемы и научные познания, согласно датам, очень молоды, возникает вопрос, проводился ли контактный разговор по этому комплексу вопросов с другими специализированными группами, например, с лимнологами, или составлялся ли обсуждаемый доклад уже ранее.

### Кречмер:

Возможно, профессор Габер выразил мнение, что в будущем предстоит тренд к более мягким зимам. Мои исследования относятся к 5-ти двухсотлетним сериям и результат этих серий опубликован в одном собственном исследовании в журнале "Погода и жизнь" центрального заве-

дения по метеорологии в Вене, в декабрьском номере 1974 г. Продолжение - оно относится к последним четырем зимам - находится в настоящее время в издательстве. Эта публикация и последняя были оценены центральным заведением по метеорологии критически; при отрицательном результате исследование не было бы опубликовано. Во всем мире можно все заново встретить в литературе указания на то, что налицо тенденция к более холодным временам. Также можно встретить указания на то, что имеет место как раз обратное. Я могу вам лишь сказать, подождите пока пройдут последующие годы, тогда вы увидите, как поведет себя тренд в дальнейшем. Во всяком случае период 1828 - 1895 гг. был наихолоднейшим периодом нового времени. Как я сказал, отношение холодной зимой к мягкой зиме составляло 1:3; в более позднее время оно составляет 1:7. В 1895 - 1928/29 гг. имел место необыкновенно теплый период. Двадцатые годы были очень мягкими. Лишь в конце двадцатых годов имела место пресловутая холодная зима 1928/29 года; равнозначная зима была 1962/63 году. Это можно было заметить к зимним холодам.

В отношении температур воды на конгрессах говорилось о том, что приблизительно 6 лет тому назад имело место повышение нагрева на  $+5^{\circ}\text{C}$ . В последние годы оно снизилось до  $+3^{\circ}\text{C}$ , т.е. вода в реке может быть нагрета посредством перемешивания с теплыми потерями предприятия на  $3^{\circ}\text{C}$ . В Америке это называют "термалполюцией"; она квалифицируется как отравление, если нагрев превышает  $3^{\circ}\text{C}$ . В Австрии границей больше не является  $25^{\circ}\text{C}$ , а допущены  $29^{\circ}\text{C}$  (если между тем не было предпринято изменение). У мест введения тепловых потерь всегда возникают водяные воронки; центральное введение в течение в настоящее время не производится. Отрицательной стороной этого является то, что, к примеру, у Цвендендорфа на 60-80 метров ширины будет находиться водяная воронка на правом берегу. Дунай имеет там ширину в 300 метров. Все это значительные противоречия. В интересной биологической публикации выдвигается требование, чтобы в водах была допущена температура лишь в  $20^{\circ}\text{C}$ , так как уже при  $20^{\circ}\text{C}$  жизнь лососей, форелей и т.д. становится невозможной. Кроме того вред должен причиняться еще и определенным, служащим пищей для рыб, водорослям, если температура воды превышает  $20^{\circ}\text{C}$ . Мы живем здесь во времени перелома. Подобно тому как думают эмоционально различно об атомных силовых установках, думают различно и в отношении температур воды.

#### Тойберт:

Рассуждения господина Шимукека не соответствуют, по моему мнению, новейшему уровню знаний. Возможно я представляю здесь мнение тех, которым приходится вести использование рек для многих целей, включительно введение охладительных вод. Имеется ряд фактов, которые противоречат установлениям господина Шимукека. Нельзя исходить из того, что введение нагретых вод должно рассматриваться как загрязнение. Тепловодные введения не обязательно влияют отрицательно на кислородный баланс в водах, а лишь тогда, когда он уже подвергался большим влиянием посредством других загрязнений. Увеличений нагрева на  $3^{\circ}\text{C}$ , которое дискутируется и которым снова руководствуются, не было научно точно обосновано. Вы никогда не найдете, кто смог бы вам назвать основания, почему именно  $3^{\circ}\text{C}$  разогрева везде стоят; это то значение, которое было названо в рамках рабочей группы ЛАВА для Рейна и было затем принято всеми другими комитетами, так как какое-либо естественно-научное обоснование не имелось. В качестве примера я могу здесь указать на то, что для реки Липпе имеется воднозаконодательное решение, согласно которому вода может быть дополнительно нагрета на  $15^{\circ}\text{C}$ . Какого-либо вреда здесь не было замечено. Рассмотрение рыбного запаса показывает, что после введения в действие электростанции он возрос для каждого гектара со 100 кг до 150 кг. Разогрев воды там разрешен до  $28^{\circ}\text{C}$ . Я не хотел бы углубить здесь эту проблематику, однако я хотел составить небольшой противовес тому, о чем говорилось в предыдущих выступлениях.

Келлер:

Последняя дискуссия затрагивает области, которые осознано не были названы в общем в качестве центра тяжести программы VIII конференции, т.е. этих конференции прогнозов. Имеются, естественно, связи с лимнологами, интенсивно изучающих проблематику свойств вод Дуная. За несколько дней до нашей конференции в этом же месте организовал свой съезд СИЛ по вопросам исследования свойств вод Дуная. Это не означает, что мы не должны учитывать результатов исследований лимнологов. С другой стороны, прогнозы уровней вод и стоков очень важны для лимнологов. Проблематика повышения температур воды посредством теплых введений должна быть знакома каждому гидрологу, однако мы должны здесь концентрироваться лишь на тех аспектах, которые важны для развития прогноза.

На одной из последующих конференций должны быть разобраны вопросы влияния колебаний климата на гидрологические процессы, т.к. они являются основополагающими для прогнозов.



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДОКЛАД      GENERALBERICHT

Прогноз изменений морфологии речных русел

Печинов Д.

Vorhersage der morphologischen Flußbettveränderungen

Pečinov D.

Оценка и прогноз русловых деформаций получают все большее значение, обуславливающееся:

1. Широким развитием строительства гидротехнических и других сооружений, требующего оценки и прогноза деформаций речного русла и поймы с учетом их рационального расположения, выбора наиболее целесообразной конструкции, оценки условий эксплуатации и т.д.
2. Регулированием речного стока, проводимым все в больших масштабах, вызываемым существенные изменения в ходе руслового процесса на участках со значительной протяженностью, являющиеся обычно весьма интенсивными и в большинстве случаев неблагоприятными.

Слабая эффективность многих защитных мероприятий, высокие эксплуатационные расходы многих сооружений, возникающие аварии в большинстве случаев обусловлены недоучетом или недостаточно правильным расчетом и прогнозом морфологических изменений речных русел.

Примеры неудач в этом отношении многочисленны. Так, например, изъятие инертных материалов (галька, песок) из речного русла р. Марица за непродолжительный период времени привело к значительному понижению коты дна реки на участках с большой длиной выше и ниже пунктов изъятия. Это, со своей стороны, привело к разрушению мостов, подпорных сооружений, дюкеров. Компрометируется работа систем по водоснабжению и наблюдается высыхание ценных древесных насаждений из-за понижения коты грунтовых вод в прилегающих к реке участках и т.д.

Одновременно необходимо подчеркнуть, что существующая теория руслового процесса и подходы к его изучению (гидравлические и гидролого-морфологические) страдают несовершенством, носят приблизительный характер и все еще не удовлетворяют нуждам практики. Объективной причиной этого является исключительная сложность руслового процесса, при решении которого необходимо привлекать такие дисциплины, как: гидрологию, геологию, земную механику, геоморфологию и многообразие форм его проявления.

Гидравлический подход, основанный на использовании методов гидравлики или методов лабораторного моделирования, дает удовлетворительные результаты при расчете и прогнозировании русловых деформаций, особенно когда последние имеют четко выраженный однонаправленный характер. Могут считаться надежными расчеты и прогнозы местных и общих размывов в нижнем бьефе сооружений, заиления водохранилищ и т.д. Гидравлический подход в теории руслового процесса рассматривает деформации речного русла как результат взаимодействия потока и русла, осуществляемое прежде всего посредством обмена наносов (1). Направленность процесса определяется из соотношении между расходом наносов и транспортирующей способностью потока. При недогрузке потока наносами происходит размыв, при перегрузке - заиление. Равенство фактического расхода наносов и транспортирующей способности потока отвечает случаю динамически устойчивого русла. Гидравлические расчеты обычно основаны на использовании уравнения баланса наносов, зависимостей, определяющих транспорт наносов, и чисто гидравлических зависимостей. Менее удовлетворительные результаты получаются, когда в рассматриваемом участке

наблюдается переотложение наносов, при оценке и прогнозировании плановых деформаций речного русла и т.д.

Гидролого-морфометрический подход в теории руслового процесса рассматривает последний с позиции геоморфологии, гидрологии и гидродинамики. На основе типизации схем деформации речного русла и поймы, создания системы их измерителей, анализа их значений и связи последних с определяющими их факторами гидролого-морфометрическая теория руслового процесса предлагает весьма хорошие возможности прогнозирования русловых деформаций. Непрерывное представление взаимодействия потока и русла классической гидродинамики сочетается с дискретным представлением морфологических особенностей русла и фрагментированием скоростного поля потока. Анализ картографических материалов одновременно с учетом геоморфологических и гидрологических данных, применение морфологических и гидролого-морфологических зависимостей дает возможность сравнительно легко и правильно прогнозировать схему будущих деформаций и в значительной степени для получения количественных показателей этих деформаций.

Вышеизложенное показывает, что отсутствуют общепризнанные исходные положения дальнейшего развития теории руслового процесса и, в частности, прогноза морфологических изменений речного русла.

Несомненна роль Конференции Придунайских стран по гидрологическим прогнозам в развитии теории и практики расчета и прогноза русловых деформаций. Представленные национальные и индивидуальные доклады показывают наличие значительной деятельности в этом направлении.

Прогнозы морфологических изменений в русле в Австрии составлялись с успехом для нижнего участка реки Инн и реки Мур. На реке Инн проводились длительные наблюдения и подсчеты по обмелению в имеющихся уже подпорных сооружениях и составлялись прогнозы по обмелению и его влиянию на уровень воды для проектируемых подпорных сооружений (2). На реке Мур были приняты многие искусственные вмешательства, анализированы их результаты и подведены итоги по причинам этого развития. На основании этих исследований составлен прогноз русловых деформаций этой реки (3).

В Болгарии в последние несколько лет обращается серьезное внимание на русловые деформации и составление прогнозов, особенно в связи с проектированием гидротехнического комплекса "Никопол-Турну Магуреле" на реке Дунай и осуществлением защитных мероприятий. Устанавливаются вековые тенденции в изменении плановых очертаний реки на болгарском участке (4), как и тенденции в изменении островов на болгарском участке реки Дунай и их судьба в условиях сооруженных гидротехнических комплексов (5). Сделана типизация русловых процессов на болгарских притоках реки Дунай (6).

В Венгрии на основании съемок рек, проводимых с конца прошлого века, на основании опыта результаты наблюдений на экспериментальных речных участках и лабораторных моделях прогнозируются тенденции естественных процессов русел рек и ожидаемое влияние проектируемого регулирования русла. Работы по регистрации морфологии рек и по прогнозированию русловых процессов разделяются на 3 группы:

- Деформации русел в плане, меандрирование и его параметры;
- Процессы, происходящие в русле, перемещение гряд и формирование русел;
- Заиление водохранилищ гидроузлов.

Наряду с эмпирическим методом, при расчете и прогнозировании русловых деформаций все чаще используются методы математической статистики. Стохастический подход к вопросу в значительной мере продвинул вперед морфологические исследования. Считается, что наиболее простым методом прогноза русловых процессов является определение характера направления и величины изменений на основании данных повторных съемок русел. Из-за характера морфологических из-

менений и сложности физического процесса зависимости, полученные теоретическим путем, на практике применяются трудно.

В ФРГ уделяется значительное внимание на исследование и прогнозирование русловых процессов, на обуславливающие их факторы и на связанные с ними взвешенные и влекомые наносы. Осуществляется картирование геологических и морфологических-гидрологических характеристик и условий. Устанавливаются гипсографические кривые, густота речной сети, области с интенсивной эрозией, проводятся механические и петрографические анализы твердого стока и русловых отложений. Исследуется заиление водохранилищ и прогнозируется размыв речных русел (7), особенно в связи с осуществлением большого судоходного пути на реке Дунай под Регенсбургом. Исследуется также влияние нарушенного режима твердого стока на ожидаемые русловые деформации на р.Изар в участках Иллер и Лех. Успешно прогнозирован дальнейший ход заиления водохранилищ на р.Инн (8).

В СССР прогнозу русловых деформаций в связи с выбором оптимальных мест расположения сооружений, их конструкции, защитными мероприятиями, улучшением судоходных условий и т.д. уделяется большое внимание. В основу такого прогноза многих рек СССР положена гидроморфологическая теория руслового процесса, созданная в последнее десятилетие в Государственном гидрологическом институте (9, 10). Прогноз руслового процесса выполняется на основе его типизации и полученных для каждого типа руслового процесса морфологических и гидроморфологических зависимостей. Первый этап исследования руслового процесса на Дунае был осуществлен на основе картографических материалов. В результате были определены границы участков с разным типом руслового процесса, значения средних скоростей плановых и высотных деформаций речного русла, а также типичные размеры макроформ и их элементов. Выявление тенденции и скорости деформации макроформ и различных видов скоплений наносов в речном русле позволили установить возможные пределы его перемещения на сроки, определяемые заданной длительностью безаварийной работы сооружения на берегах русла. Большую помощь в определении тенденции деформаций и их возможных пределов оказал разработанный прием восстановления прежних положений речного русла, основанный на дешифрировании рисунка рельефа поверхности речной поймы, т.е. по следам деятельности потока. На Дунае морфологическая съемка показала большую роль в формировании берегов русла волновых воздействий (ветровых и судовых волн), приводящих к проявлению специфических форм подмыва береговых откосов.

Значительные работы в области исследований и прогноза русловых деформаций проводятся в Югославии. Кроме решения практических вопросов, там предпринимаются опыты теоретического обобщения, и в этом отношении следует подчеркнуть работы "Математическая модель для прогноза деформации русла водотока в квазистационарных условиях" (11) и "Изменения режима влекомых наносов аллювиального водотока под влиянием неравномерной работы гидроэлектростанции" (12).

На настоящей VIII Конференции Придунайских стран по гидрологическим прогнозам по главной теме 5 "Прогноз изменений морфологии речных русел" представлены 7 докладов, рассматривающих, преимущественно, русловые деформации под влиянием человеческой деятельности.

Значительный интерес представляет работа Х.Ахаммера "Результаты обмеления водохранилища на р.Инн". Установлены интересные зависимости, характеризующие заиление водохранилища в условиях каскадного сооружения, и уравнение обмеления, имеющие и прогностический характер.

В докладе Д.Печинова, Г.Гергова и И.Ненова "Прогноз русловых деформаций в нижнем бьефе гидроузла "Никопол - Турну Магуреле" описывается методика и приводятся результаты прогноза размыва речного русла вследствие тенденции насыщения лишнего в значительной степени потока наносами ниже водохранилища за счет размыва дна и берегов. Применена методика, основанная на использовании балансового уравнения наносов и сравнения транспортирующей способности в условиях измененного режима твердого и жидкого стока.

В работе Щ. Райнова, И. Нинова, С. Василева и Д. Печинова "Влияние гидроузла "Железные ворота" на расход и режим взвешенных наносов р. Дунай" рассматривается влияние вошедшего в 1971 году в регулярную эксплуатацию гидротехнического комплекса "Железные ворота" (км. 943) на расход транспортированных взвешенных наносов и их режим, что неминуемо окажет влияние на русловые деформации и следует иметь в виду при прогнозировании заиления проектируемых ниже его водохранилищ.

В докладе Л. Калчева "К прогнозированию русловых процессов с помощью ЭВМ" на основе уравнения баланса взвешенных наносов составлены алгоритмы и программа для прогнозирования русловых процессов в условиях нижнего Дуная под влиянием водохранилищ. При составлении методики учитывались воздействие притоков реки, переменные гидрографы расходов воды и наносов, поперечных профилей и коэффициент шероховатости и др. Программа охватывает практически неограниченное число интервалов времени и поперечных профилей. Она существенно облегчает исследования по прогнозированию русловых процессов и дает возможность вариантных расчетов.

В разработке К. Шойрмана "Морфологические изменения русла Изар и их воздействие на Дунай" рассматриваются наступившие значительные русловые деформации под влиянием сооруженного каскада из 4 гидроузлов на р. Изар, как и отражение на речном русле р. Дунай. Сделано ценное сопоставление результатов прогнозов и фактического переформирования русла.

В докладе Б. Ф. Смищенко и Г. Г. Месерлянс "Прогноз руслового процесса при вынужденном размещении портовых акваторий на морфологически неблагоприятных участках р. Дунай" исходя из общих принципов, основанных на гидроморфологической теории руслового процесса и принципов взаимодействия сооружений с рекой, рассматривается пример расположения акваторий порта на пляже слабомеандрирующего русла Дуная. Последний является весьма устойчивым русловым образованием и его искусственное удаление как правило к успеху не приводит - быстро восстанавливается потоком. Предложены методы учета количественных характеристик гидрологического, гидравлического и руслового режима участка реки при проектировании акватории порта, а также сооружений, защищающих акваторию от занесения наносами.

В докладе В. Н. Михайлова и М. М. Рогова "Ожидаемые изменения русловой сети и распределения стока воды в устьевой области Дуная" на основе гидравлично-морфометрических методов расчета обнаружена тенденция сокращения количества рукавов, упрощения структуры русловой сети, установлена интенсивность процессов перестройки русловой сети и перераспределения стока воды в устьевой области Дуная. Отмечается, однако, что крупные водохозяйственные мероприятия могут усилить естественную тенденцию и существенно изменить ее.

Из сказанного до сих пор можно сделать следующие выводы:

1. Теория оценки и прогноза русловых деформаций все еще в таком состоянии, что не может удовлетворить полностью и с достаточной надежностью нужды практики. Необходимо дальнейшее развитие методов расчета и прогнозирования русловых процессов.
2. Так как русловые процессы обуславливаются факторами гидродинамического, гидрологического, геоморфологического характера, то дальнейшее развитие методов расчета и прогнозирования должны быть осуществлены коллективно специалистами из области гидродинамики, гидрологии и геоморфологии.
3. Исходя из потребностей практики, прежде всего гидротехнического строительства, главными направлениями развития прогнозов русловых деформаций могут быть:
  - Разработка методов прогнозирования общих русловых деформаций при естественном режиме;
  - Уточнение и улучшение методов расчета и прогноза режима, размера и форм проявления деформаций при зарегулированном режиме стока - заиление водохранилищ, местный и общий размыв ниже водохранилищ.

Особое внимание следует обратить на условия образования отмытка (естественное стабилизирование речного русла, получающееся при вынесении мелких фракций и формировании неразмываемого пласта из крупных фракций). Заслуживает внимание и вопрос об использовании энергии потока для осуществления ископных работ при регулировании речных русел, сооружении водоотводных каналов ГЭС и гидроузлов, оросительных каналов и т.д. Важным является вопрос об изучении и прогнозировании русловых деформаций, наблюдающихся при изъятии инертных материалов непосредственно из речного русла, как и определение количества возможного для изъятия материала, при котором деформации не должны превышать определенный размер.

4. Несомненным вкладом в развитии теории и практики прогнозирования морфологических изменений речных русел являются Конференции Придунайских стран по гидрологическим прогнозам, в частности, настоящая VIII Конференция.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Караушев А.В. Речная гидравлика. Гидрометеиздат, Ленинград, 1969.
2. Мундт Г. Прогнозы обмеления речных водохранилищ. VI Конференция Придунайских стран по гидрологическим прогнозам, Киев, 1972.
3. Браунер В. Воздействие искусственных вмешательств на будущее оформление русла реки Мур. VI Конференция Придунайских стран по гидрологическим прогнозам, Киев, 1972.
4. Михайлов Ц. Геоморфология болгарского берега р. Дунай. София (в печати).
5. Райнов Щ., Нинов И., Печинков Д., Косев Н. Морфологические изменения Дунайских островов от км. 845 до км. 375. Варна, 1973
6. Гергов Г. Типы русловых процессов на притоках р. Дунай в Болгарии. VII Конференция Придунайских стран по гидрологическим прогнозам, Варна, 1973.
7. Bauer F. Der Geschiebahaushalt der bayerischen Donau im Wandel wasserbaulicher Maßnahmen. Die Wasserwirtschaft, Heft 4 und 5, 1965.
8. Mundt G. Die Untersuchung des Einflusses der Geschiebe- und Schwebstoffführung auf die Sohlen- und Wasserspiegel-lage in Stauseen, abgeleitet aus den Messungen und Beobachtungen an der Innstufe Ering. Mitteilungen aus dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Berlin, Nr. 51, 1959.
9. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Теоретические основы прогнозов деформации речного русла. VI Конференция Придунайских стран по гидрологическим прогнозам, Киев, 1972.
10. Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Смищенко Б.Ф. Особенности изучения руслового процесса на советском участке Дуная. VII Конференция Придунайских стран по гидрологическим прогнозам, Варна, 1973.
11. Милорадов М., Баошич М. Математическая модель для прогноза деформаций русла водотока в квазистационарных условиях. VI Конференция Придунайских стран по гидрологическим прогнозам. Киев, 1972.
12. Божинович М. Изменения режима влекомого наноса аллювиального водотока под влиянием неравномерной работы гидроэлектростанций. VI Конференция Придунайских стран по гидрологическим прогнозам, Киев, 1972.



ВЛИЯНИЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА "ЖЕЛЕЗНЫЕ ВОРОТА"  
НА РАСХОД И РЕЖИМ ВЗВЕШЕННЫХ НАНОСОВ р.ДУНАЙ

Райнов Щ., Нинов И., Василев С., Печинов Д.

DER EINFLUSS DER STAUSTUFE "EISERNES TOR"  
AUF DIE SCHWEBSTOFFFOHRUNG DER DONAU

Rajnov ŠČ., Ninov I., Vasilev S., Pečinov D.

Резюме

В работе рассматривается влияние вошедшего в регулярную эксплуатацию в 1971 году гидроузла "Железные ворота" (км.943) на расход транспортированных взвешенных наносов и их режим у гидрометрической станции около г.Свиштов (км.554).

Устанавливается, что среднегодовой расход взвешенных наносов и мутность речной воды уменьшились на 87%. Это, разумеется, окажет свое влияние на русловые деформации ниже гидроузла, при прогнозировании которых определение изменений наносов особенно важно. Существенное изменение наблюдается и во внутригодовом распределении расходов взвешенных наносов и мутности.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird der Einfluß der im Jahre 1971 in Betrieb gesetzten Staustufe "Eisernes Tor" auf Menge und Regime der transportierten Schwebstoffe bei der Pegelstelle Swischtov (km 554) behandelt.

Es wird festgestellt, daß die mittlere jährliche Schwebstoffführung und Schwebstoffbelastung der Donau sich auf 87% vermindert hat. Das wird ohne Zweifel die Flußerosion unterhalb der Staustufe beeinflussen, für deren Vorhersage die Feststellung der veränderten Feststoffführung von besonderer Bedeutung ist. Eine Veränderung wird auch in der Jahresverteilung der Schwebstoffführung und der Schwebstoffbelastung nachgewiesen.

На расход и режим взвешенных наносов в нижнем участке р.Дунай существенное влияние оказывает гидротехнический комплекс "Железные ворота" (км.943), вошедший в регулярную эксплуатацию в 1971 году.

Объем водохранилища гидрокомплекса составляет  $2,1 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>, объем среднегогодового стока -  $190 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup>, среднегогодовой расход взвешенных наносов -  $39 \cdot 10^6$  т.

В водохранилище гидроузла, вследствие уменьшения транспортирующей способности течения, откладывается значительное количество транспортированных рекой наносов.

В настоящей работе рассматривается изменение расхода и режима взвешенных наносов р.Дунай под влиянием гидротехнического комплекса "Железные ворота" на основе регулярных измерений наносов у г.Свиштов (км.554) за период 1961 - 1974 гг.

Общее число измерений за период ненарушенного режима наносов (1961 - 1970) составляет 2448, или 272 в год, а за период нарушенного режима (1971 - 1974) - 1203, или 301 в год. Пункт, в котором проводились измерения наносов р.Дунай, находится на значительном расстоянии ниже гидроузла - 389 км. Под влиянием притоков р.Дунай в этом участке наносозадерживающий эффект водохранилища значительно притуплен. Кроме того, река насыщена дополнительным количеством наносов в результате размыва дна и берегов между водохранилищем и пунктом измерения, вследствие несоответствия между фактическим содержанием наносов в ней и ее транспортирующей способностью.

Несмотря на сказанное выше, уменьшение расхода наносов р. Дунай у г. Свиштов существенное (таблица 1). Средний расход взвешенных наносов от 1664 кг/с за период 1961 - 1970 гг изменился на 917 кг/с в период после построения гидрокомплекса "Железные ворота" 1971-1974 гг, мутность воды реки за указанные периоды изменилась от 261 г/м<sup>3</sup> до 167 г/м<sup>3</sup>.

Год	Q м <sup>3</sup> /с	R кг/с	S г/м <sup>3</sup>
1961	4951	1478	299
1962	6253	1754	281
1963	5552	1652	297
1964	5409	1785	330
1965	7272	1943	267
1966	7466	1786	248
1967	6667	1609	242
1968	5563	1429	257
1969	5964	1672	280
1970	8698	1532	176
1971	4767	898	198
1972	5525	1056	198
1973	5001	822	165
1974	6700	893	134
Среднее за период 1961-1970	6380	1664	261
Среднее за период 1971-1974	5500	917	167

Таблица 1. Среднегодовые значения расходов взвешенных наносов R кг/с мутности S г/м<sup>3</sup> р. Дунай у г. Свиштов (км. 554)

Более репрезентативно сопоставление характеристик наносов за сравнимые периоды в отношении расходов воды до и после построения "Железных ворот". Такими являются периоды 1961-1964 и 1971-1974 гг (рис. 1), они имеют одинаковые среднееголетние расходы воды - 5 500 м<sup>3</sup>/с за первый и второй периоды. Среднееголетний расход взвешенных наносов за период 1961-1964 гг. составляет 1 710 кг/с, в то время как за период 1971-1974 гг - 917 кг/с, т.е. изменился в 1,87 раз, или на 87%. Средняя мутность за период 1961-1964 гг составляла 312 г/м<sup>3</sup>, а за период 1971-1974 гг - едва 167 г/м<sup>3</sup>, т.е. также уменьшилась на 87%.

Существенное изменение констатируется и в наблюдаемых максимальных значениях расходов взвешенных наносов и мутности за периоды до и после построения "Железных ворот", что видно из таблицы 2.

Характеристика		Периоды	
		1961-1970	1971-1974
Расход взвешенных наносов (кг/с)	Макс. среднегодовой	1943	1056
	Макс. среднемесячный	6088	2574
	Абсол. максимальный	53253	15463
Мутность (г/м <sup>3</sup> )	Макс. среднегодовая	330	198
	Макс. среднемесячная	681	308
	Абсол. максимальная	2657	1467

Таблица 2. Сравнение максимальных значений взвешенных наносов и мутности р. Дунай у г. Свиштов (км. 554) за периоды до и после построения "Железных ворот"

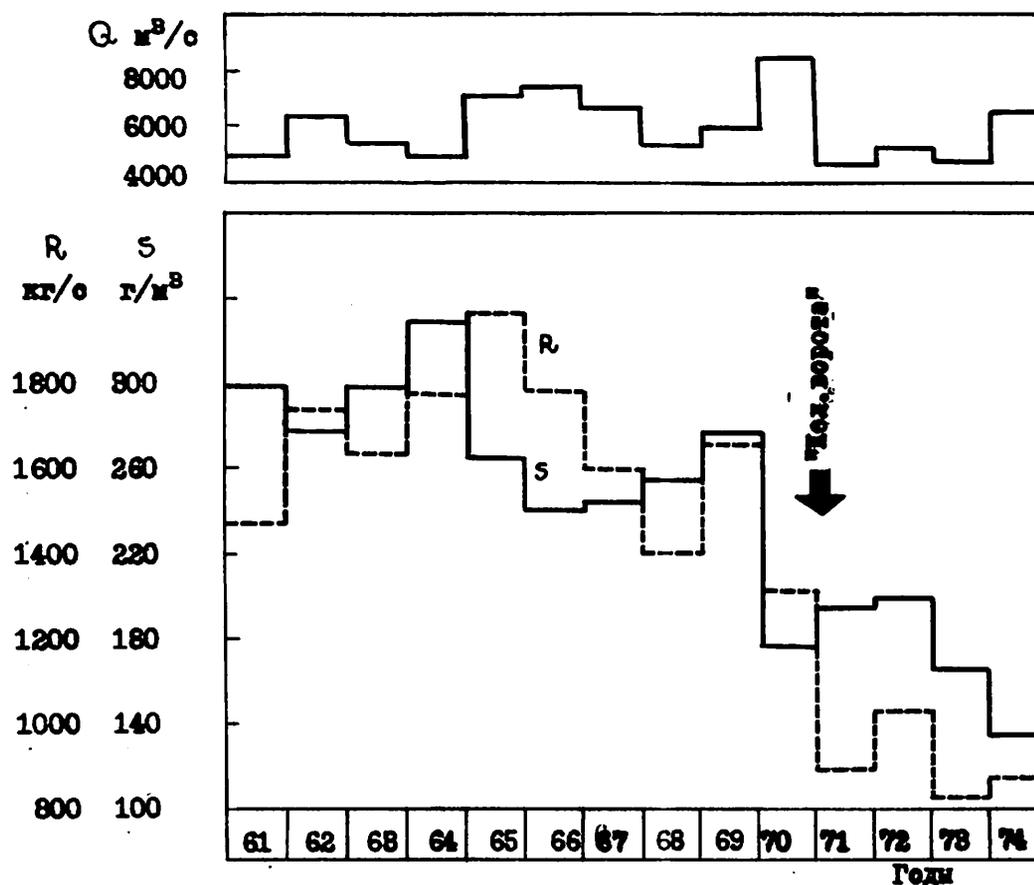


Рис. 1 Изменение расходов взвешенных наносов R, мутности S и расходов воды Q р. Дунай у г. Свиштов (км. 554) в период 1961-1974 гг.

Под влиянием гидрокомплекса "Железные ворота" устанавливается новая зависимость между среднегодовыми значениями расхода взвешенных наносов  $R$  и расхода воды  $Q$  у г. Свиштов (рис. 2), существенно различающаяся от установленной такой до нарушения режима стока наносов.

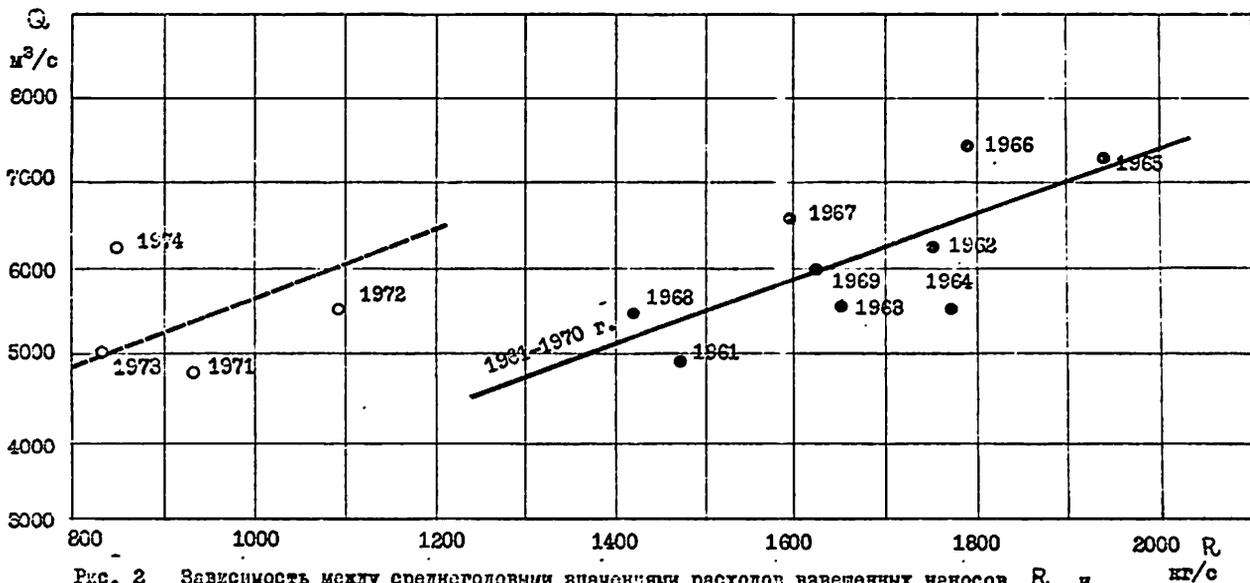


Рис. 2 Зависимость между среднегодовыми значениями расходов взвешенных наносов  $R$  и расходов воды  $Q$  р. Дунай у г. Свиштов (км. 554) в периоды до и после сооружения гидрокомплекса "Железные ворота"

Представляет интерес установление изменения внутригодового распределения расхода взвешенных наносов и мутности. Оно осуществлено на основе данных среднемноголетних значений расходов взвешенных наносов и мутности у г. Свиштов за периоды 1961-1970 гг и 1971-1974 гг (таблица 3). Из данных таблицы 3 и рис. 3 видно, что налицо выравнивание внутригодового хода изменения расхода взвешенных наносов и мутности воды р. Дунай в рассматриваемом участке.

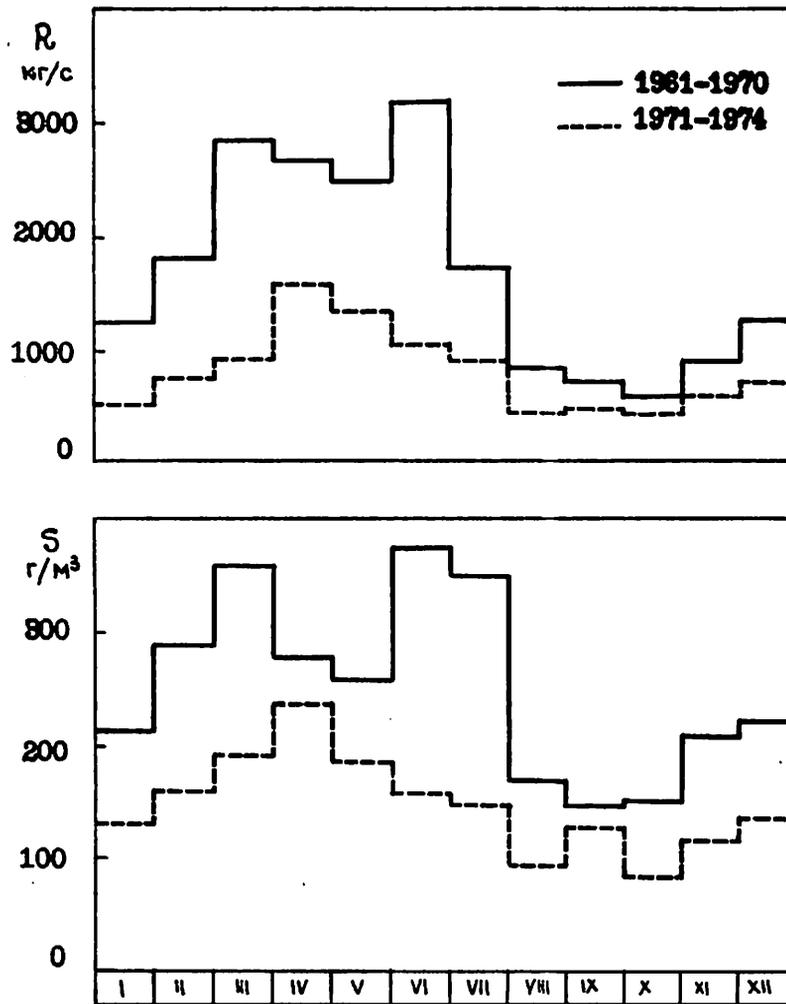


Рис. 8 Внутригодовое распределение расходов взвешенных наносов  $R$  и мутности  $S$  р. Дунай у г. Свиштов (км. 554) в периоды до и после сооружения гидрокомплекса "Железные ворота"

Элемент	Размерность	Месяцы											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
		Период 1961 - 1970 гг.											
R	кг/с	1250	1820	2860	2670	2440	3160	1720	854	727	609	903	1220
R	%	6.2	9.0	14.1	13.2	12.1	15.6	8.5	4.2	3.6	3.0	4.5	6.0
S	г/м <sup>3</sup>	215	290	355	282	261	375	250	170	152	157	214	222
		Период 1971 - 1974 гг.											
R	кг/с	561	830	970	1600	1379	1046	901	461	500	460	638	707
R	%	5.6	8.3	9.7	16.9	13.7	10.4	9.0	4.6	4.9	4.6	6.3	7.0
S	г/м <sup>3</sup>	132	163	192	240	189	163	150	97	138	85	117	138

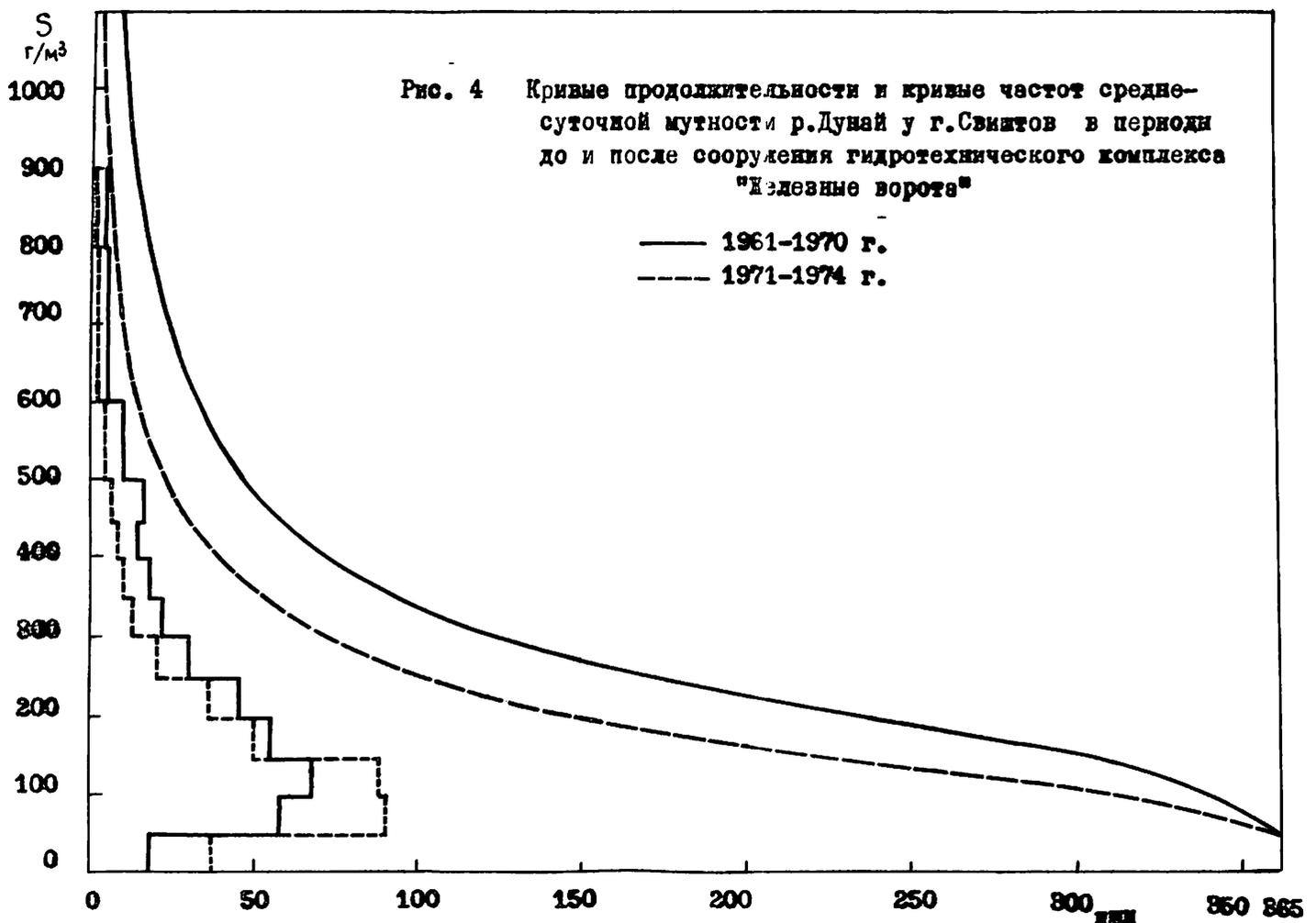
Таблица 3

Внутригодовое распределение расходов взвешенных наносов  $R$  и мутности  $S$  р. Дунай у г. Свиштов (км. 554) за период до и после построения гидрокомплекса "Железные ворота"

Под влиянием гидрокомплекса "Железные ворота" существенно изменяется и продолжительность кривой и частота среднесуточной мутности (таблица 4, рис.4). Так, например, средняя продолжительность мутности, выраженная в днях, при ее значении выше  $300 \text{ г/м}^3$  за период после 1971 года приблизительно в два раза меньше в сравнении с такой до нарушения режима стока наносов. Частота среднесуточной мутности при значении  $S$  приблизительно до  $150 \text{ г/м}^3$  в период после построения гидрокомплекса "Железные ворота" больше такой до его построения, в то время как при значениях выше  $150 \text{ г/м}^3$  частота ее меньше, что видно из таблица 5 и рис.4.

Мутность в $\text{г/м}^3$	П е р и о д ы	
	1961-1970	1971-1974
более 100	340	310
более 200	225	150
более 300	120	60
более 400	70	35
более 500	40	23
более 600	30	15
более 700	25	13
более 800	20	10

Таблица 4 Продолжительность в днях среднесуточной мутности р.Дунай у г.Свиштов за период до и после построения гидрокомплекса "Железные ворота"



Установление изменения взвешенных наносов имеет существенное значение в связи с прогнозированием русловых процессов после гидрокомплекса "Железные ворота", прогнозирования заиления новопроектированных водохранилищ ниже его "Железные ворота-2", Никопол - Турну Магуреле и "Черна вода", прогнозирования деформаций ниже их и т.д.

Мутность г/м <sup>3</sup>	Периоды	
	1961-1970	1971-1974
до 50	18	37
50 - 100	58	90
100 - 150	68	87
150 - 200	55	51
200 - 250	45	38
250 - 300	30	19
300 - 350	21	12
350 - 400	15	6
400 - 450	10	6
450 - 500	12	5

Таблица 5 Частота в днях среднесуточной мутности р. Дунай у г. Свиштов за период до и после построения гидрокомплекса "Железные ворота"



ПРОГНОЗ РУСЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ  
ГИДРОУЗЛА "НИКОПОЛ-ТУРНУ МАГУРЕЛЕ"

Печинов Д., Гергов Г., Ненов И.

VORHERSAGE OBER VERÄNDERUNGEN DES FLUSSBETTES DURCH  
DEN BAU DER STAUSTUFE NIKOPOL - TURNU-MAGURELE

Pečinov D., Gergov G., Nenov I.

Резюме

В работе дается описание методики и результатов прогноза русловых деформаций в нижнем бьефе гидротехнического комплекса "Никопол - Турну Магуреле" на р. Дунай (км. 581), наступающих вследствие изменений в расходе и режиме твердого стока.

Zusammenfassung

Durch den bevorstehenden Bau der Staustufe Nikopol - Turnu-Magurele werden sich die Abflußverhältnisse sowie die Schwebstoff- und Feststoffführung der Donau wesentlich verändern. Das wiederum wird zu Veränderungen des Flußbettes führen. Vorhersagen über diese Veränderungen sind von besonderem Interesse im Hinblick auf die Erhaltung der Wasserbauten und die Aufrechterhaltung der Donauschiffahrt.

Der vorliegende Beitrag behandelt die Ergebnisse, die mit Hilfe einiger numerischer Verfahren für die Vorhersage der Bettveränderungen der Donau erzielt wurden.

Режим наносов в нижнем течении р. Дунай в значительной степени нарушен вследствие сооруженного гидротехнического комплекса "Железные ворота" (км. 943). Предусмотренное строительство болгаро-румынского гидротехнического комплекса "Никопол - Турну Магуреле" (км. 581) неминуемо вызовет дальнейшее изменение режима наносов реки ниже его, выражающее, прежде всего, в существенном уменьшении расхода наносов вследствие отложения значительной части их в водохранилищах.

Из-за несоответствия между транспортирующей способностью реки в нижнем бьефе и фактическим содержанием наносов в ней наступит интенсивный размыв русла на значительном расстоянии от гидроузла, прогнозирование чего имеет большое значение.

Определение русловых деформаций в нижнем бьефе после гидроузла "Никопол - Турну Магуреле" осуществлено по методу проф. Караушева. Метод основан на уравнении баланса наносов последовательно расположенных участков и сравнении транспортирующей способности реки в условиях нарушенного режима с количеством поступающих наносов из расположенных выше участков.

Исследования проведены для участка реки длиной 30 км (км. 581 - 551). На базе наличных поперечных и продольных геологических профилей морфометрических характеристик поперечных сечений река была разделена на расчетные участки (рис. 1) с одинаковой геологической структурой и сравнительно одинаковыми средними морфометрическими характеристиками. Длина участков изменяется от 1 до 5 км. Рассматриваемые участки принимаются с константной шириной, глубиной и гранулометрическим составом русловых отложений. Отношение между наибольшей и наименьшей шириной при данном расходе воды достигает 2,53, а отношение между средними глубинами - до 2,85. Русло реки в своей преобладающей части состоит из мелкого песка с большим содержанием (до 50%) гальки.

Вычисления проведены для расходов, определенных из среднего гидрографа (рис. 2): 4 000, 5 500, 8 600, 13 000, 11 600, 8 000, 6 500, 4 600 и 2 800 м<sup>3</sup>/с.

Интервалы времени  $\Delta t_j$ , для которых вычисляются деформации речного русла, принимаются в соответствии с продолжительностью наблюдения данного среднего расхода воды согласно расчетному гидрографу.

Деформации  $\Delta h_{ij}$  для участка  $i$  за время  $\Delta t_j$  определены по трансформированным нами формулам проф. Караушева

$$\Delta h_{ij} = \frac{P_{i-1,j} - P_{ij}}{1 - \delta_i} \cdot \frac{\Delta t_j}{\Delta x_i} \quad (м)$$

$$P_{ij} = A_{ij} \cdot \Gamma_{ij} \cdot V_{ср\ ij}^3 \quad (м^3/с/м)$$

где:

- $P_{ij}$  - частичный расход наносов на участке  $i$  за время  $\Delta t_j$ ;  
 $A_{ij}$  - определяется по составленному авторами графику, данному на рис.3, в зависимости от коэффициента Шези  $C$ ;  
 $\Gamma_{ij}$  - гидромеханический параметр, которых определяется из графика на рис.4 в зависимости от гидравлической крупности  $U$ , средней скорости  $V_{ср}$  и коэффициента Шези  $C$ .

$$C = 33 \left( \frac{H_{ij}}{d_i} \right)^{1/6};$$

- $H_{ij}$  - глубина в м;  
 $d_i$  - средний диаметр отложений в мм;  
 $\delta_i$  - коэффициент пористости;  
 $\Delta x_i$  - длина участка в м.

Расчеты выполнены последовательно от участка к участку, вниз по течению реки для первого интервала времени, затем в этом порядке для второго интервала времени и т.д., учитывая при этом изменение кривой свободной водной поверхности, эвентуальные изменения в гранулометрическом составе русловых отложений и др.

Суммарные деформации в участке  $i$  для всех  $n$  интервалов времени определяются как сумма частичных деформаций  $\Delta h_{ij}$  учитывая знак последней величины - положительный для заиления и отрицательный для размыва.

На рис.5 представлены результаты полученных деформаций в нижнем бьефе гидроузла "Никопол-Турну Магуреле" за первые три года после пуска его в эксплуатацию. Как видно, налицо значительные деформации, достигающие 2 м для сравнительно короткого периода времени.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Караушев А.В. Речная гидравлика. Гидрометеиздат, Л., 1969.
2. Караушев А.В. Проблемы динамики естественных водных потоков. Гидрометеиздат, Л., 1960.

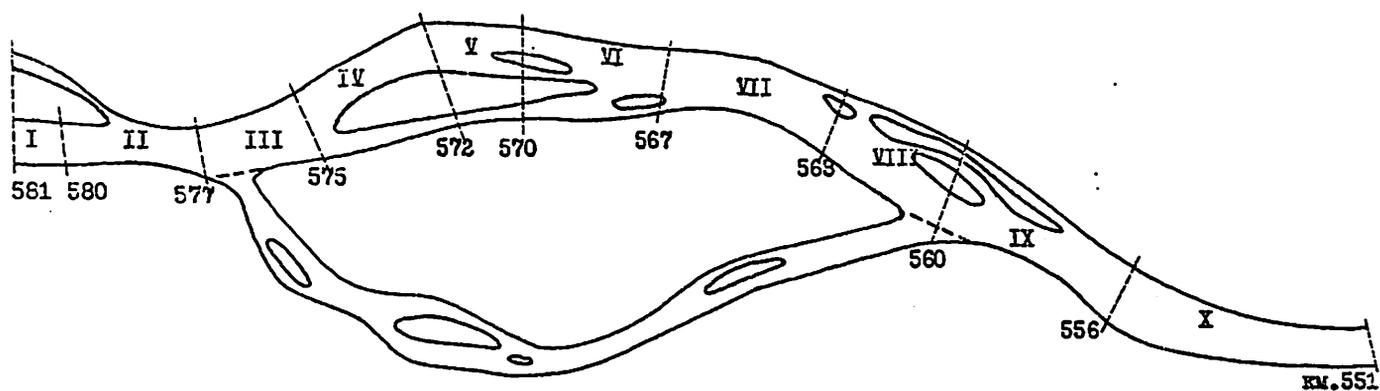


Рис. 1 Схема расчетных участков ниже гидроузла "Никопол-Турну Магуреле" (км.581-551)

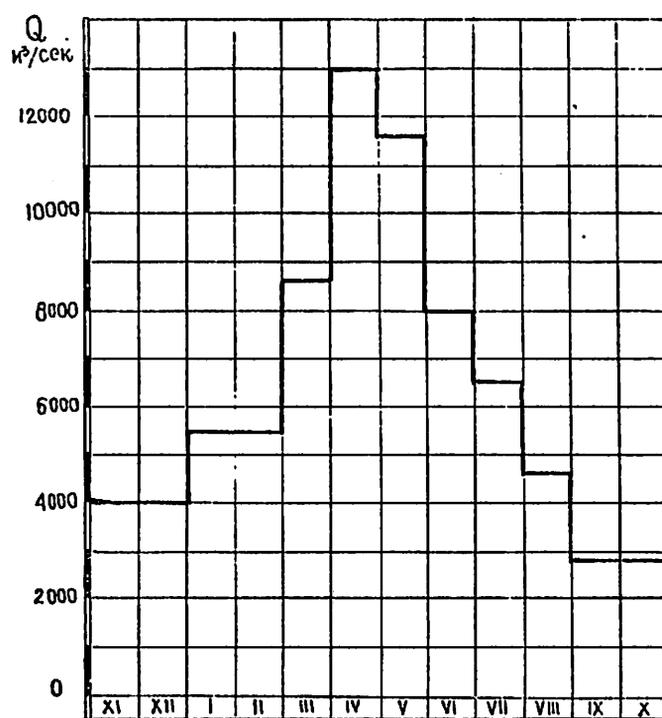


Рис. 2 Средний гидрограф расходов воды р. Дунай у гидроузла "Никопол-Турну Магуреле"

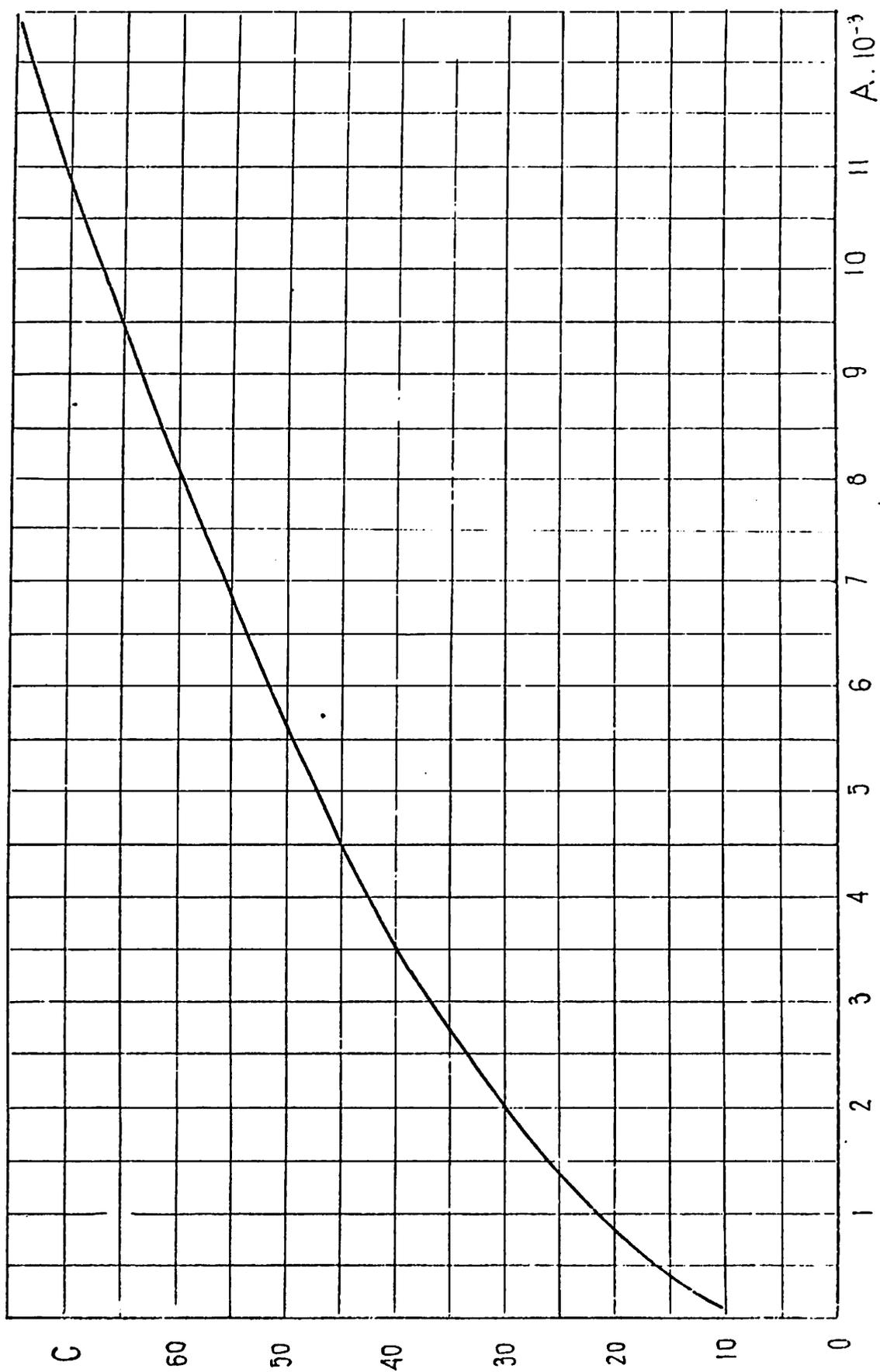


Рис. 3 Зависимость между параметром А и коэффициентом Гези С

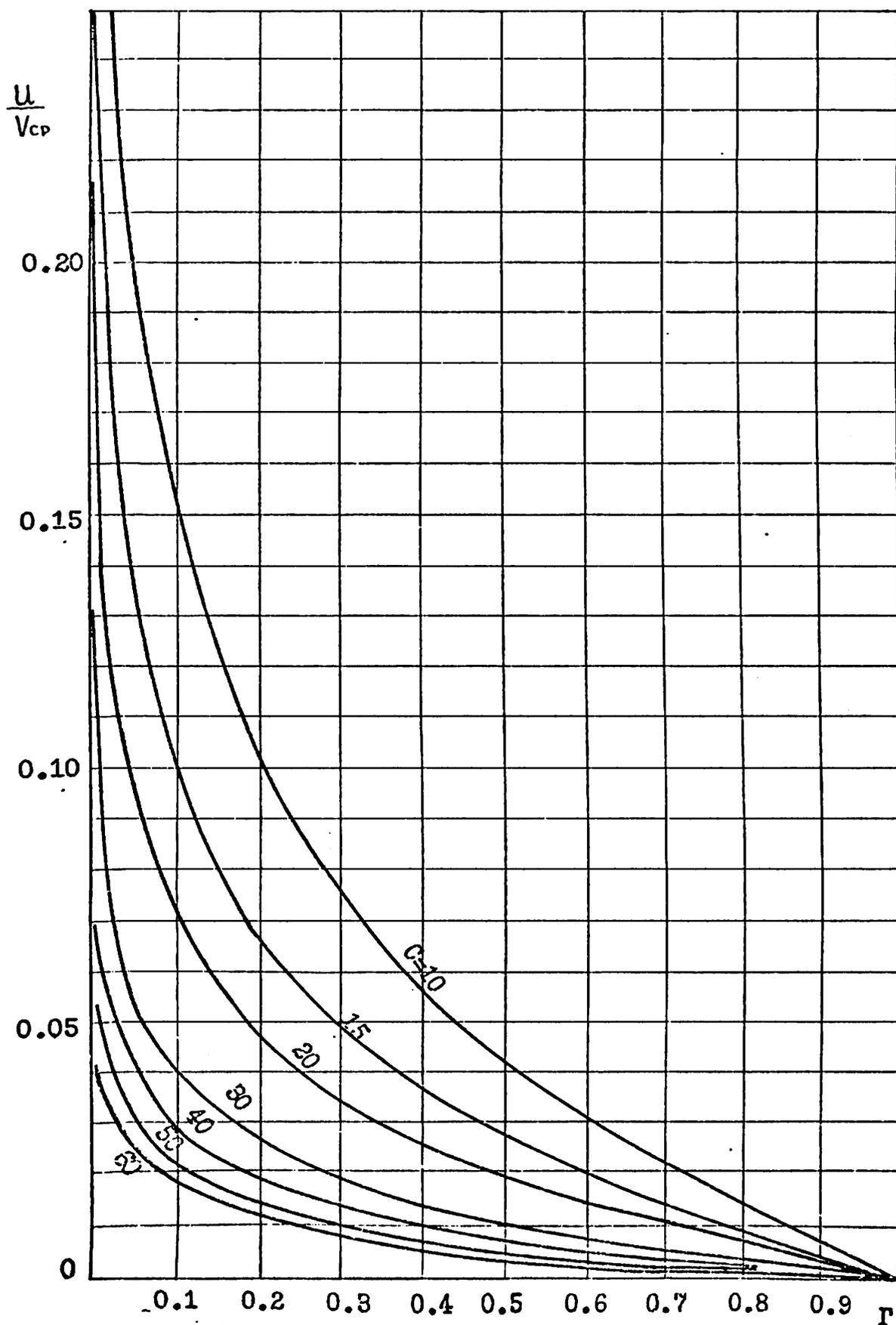


Рис. 4 Зависимость между гидромеханическим параметром  $\Gamma$ , отношение между гидравлической крупностью и средней скоростью и коэффициентом Цези  $C$  (по проф. Караушеву)

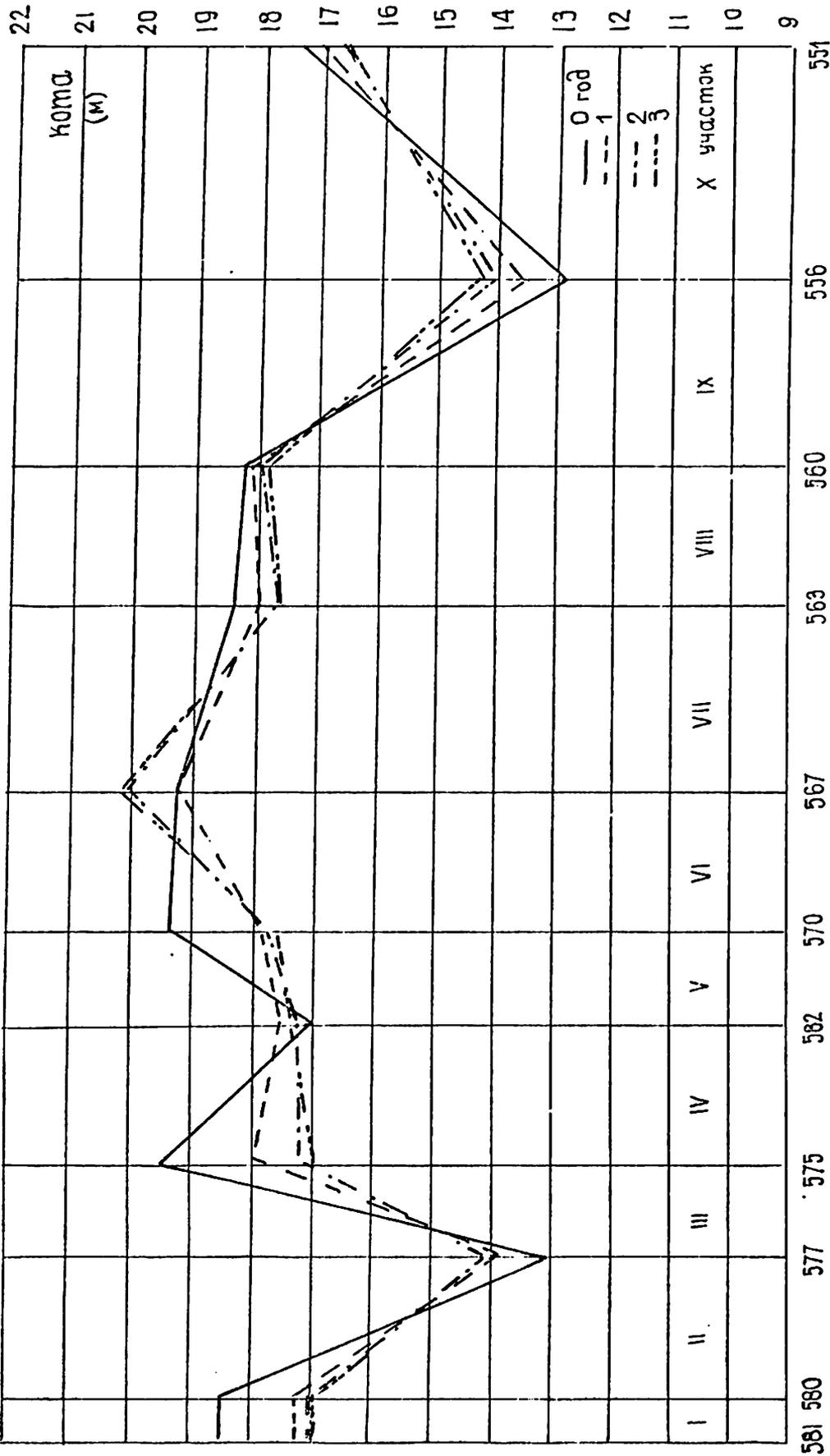


Рис. 5 Деформации в нижнем бьефе гидротехнического комплекса "Нижнеол-Турну Мэгуреле" км. ч.рез одне, два и три года после пуска его в эксплуатацию

VORHERSAGE DER WASSERGÖTE AN DER DONAU

K. Iwanov und K. Zankov

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ р. ДУНАЙ

К. Иванов и К. Цанков

Zusammenfassung:

In dem Artikel wird die Frage der langfristigen Prognose der Monats- und Jahresmittel der Mineralisation (Summe der Hauptionen) des Donauwassers bei der Stadt Russe (km 496) in Abhängigkeit von der Änderung der Wassermenge dargelegt.

Mittels Bestimmung der Koeffizienten in der Parabelgleichung  $\sum y = a Q^n$  für drei kennzeichnende Zeiträume mit Dauer von je 7 Jahren werden die prognostischen Abhängigkeiten für  $a$  und  $n$  ermittelt.

Резюме:

В статье рассматривается вопрос о долгосрочном прогнозе среднемесячной и среднегодовой минерализации (суммы ионов) речных вод р. Дунай у г. Руссе (км. 496) в зависимости от изменения расхода воды.

Путем определения коэффициентов в параболическом уравнении  $\sum y = a \cdot Q^n$  для трех характерных периодов продолжительностью порядка 7 лет, получаются прогностические зависимости для  $a$  и  $n$ .

Für die Volkswirtschaft der Donauländer ist der Donaustrom von ausschließlicher Bedeutung als Quelle des für die Bedarfsdeckung notwendigen Wassers. Neben der Zunahme der Nutzung der Donauwässer wächst auch die Industrie in ihrem Einzugsgebiet bedeutend an, was zur Verschlechterung der Wasserqualität führt. Dies kann in Zukunft auch die Verwendung des Wassers für wasserwirtschaftliche Zwecke unmöglich machen. Die immer größere Verunreinigung der Donauwässer beginnt alle Donauländer ernsthaft zu beunruhigen. Um wirksame Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserqualität treffen zu können, ist eine gründliche Kenntnis des jetzigen Verunreinigungszustandes des Stromes nach hydrochemischen Kennziffern sowie der Tendenzen der Änderung in Abhängigkeit von den hydrologischen Vorgängen und der menschlichen Tätigkeit notwendig.

Im vorliegenden Artikel wird der Versuch gemacht, die Änderung einer der Kennziffern der Wasserverunreinigung zu prognostizieren, und zwar der allgemeinen Mineralisation (Summe der Hauptionen  $\sum u$ ) in Abhängigkeit von der Wassermenge bei der Stadt Russe (km 496). Als Basis der Untersuchungen dienten Erhebungen im Zeitraum 1954-1974. Bekanntlich ist der natürliche Chemismus der Flüsse abhängig von verschiedenen Faktoren, von denen die geologische Struktur, die Höhe der Niederschläge, die Höhe des Abflusses und die Art der Speisung die wesentlichste Bedeutung haben. Beim Vorliegen eines so gewaltigen Komplexes der Einflußnahme der physisch-geographischen Umwelt auf die Flußwässer ist deren chemischer Zustand recht verschiedenartig und unterliegt bedeutenden Schwankungen innerhalb von 24 Stunden, im Laufe eines Jahres sowie einzelner Jahre in Abhängigkeit vom Einwirkungsgrad des einen oder anderen Faktors. So beginnt beispielsweise die Mineralisation der Donauwässer mit Anfang der Frühlingswässer - wenn die Schnee- und Regenwässer in den Strom eingehen - abzunehmen, und erreicht ihr Minimum in den ersten Sommermonaten, wenn der Zufluß schwach mineralisierter Wässer von den Alpengletschern stärker wird. Eine Maximalmineralisation wird im Zeitraum des Hauptabflußminimums (Oktober - November) beobachtet, wobei für einige Jahre das Maximum in den Zeitraum der Winterwasserarmut (Abb. 1) fällt. Unabhängig von diesen Schwankungen in der Qualitätszusammensetzung werden die Flüsse bei natürlichen Bedingungen durch eine relative Stabilität in ihrem chemischen Bestand und mit Überwiegen ein- und derselben gelösten Stoffe innerhalb des Jahres ihrem ganzen Lauf entlang oder in einzelnen Abschnitten gekennzeichnet. Dieses Überwiegen bleibt für eine lange Zeitspanne beibehalten, wobei es sich beim Wechsel der spezifischen physiko-chemischen und hydrologischen Verhältnisse, die den Zustand des Wassers oder seine Verunreinigung beeinflussen, ändert.

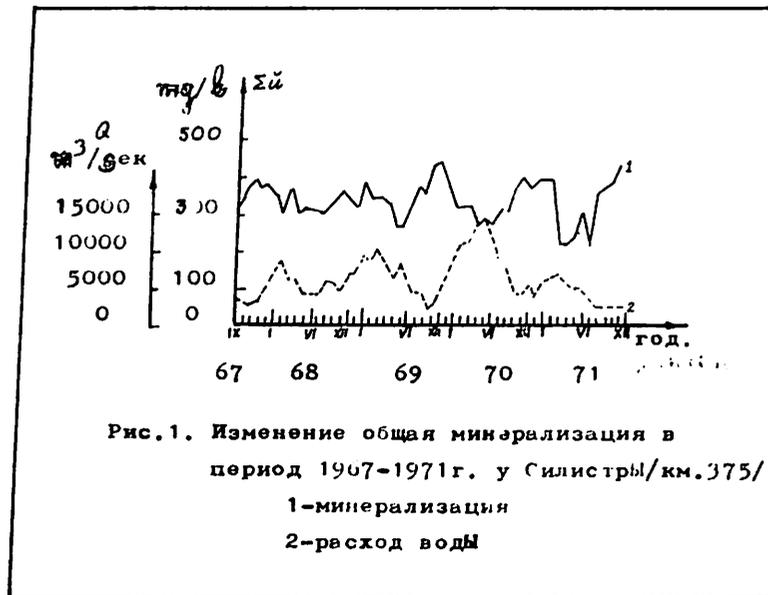


Abb. 1: Änderung der allgemeinen Mineralisation im Zeitraum 1967 - 1971 bei der Stadt Silistra (km 375)

Es wurde bereits zuvor erwähnt, daß im Prinzip eine Tendenz zur umgekehrten Abhängigkeit zwischen der Mineralisation des Wassers und der Wassermenge besteht. Diese Abhängigkeit kann jedoch graphisch nicht zufriedenstellend zum Ausdruck gebracht werden infolge der großen Streuung der Punkte. Bedeutend bessere Ergebnisse werden mit der geraden Parabelabhängigkeit zwischen der Wassermenge ( $Q$ ) und dem Ionenabfluß ( $Q \cdot \Sigma u$ ) der Art  $\Sigma y = a \cdot Q^n$  (Abb. 2) erzielt. Mit Hilfe dieser Abhängigkeit wurde anhand der Monatsmittel der Wassermenge und der Wassermaneralisation festgestellt, daß sich innerhalb des Zeitraumes 1954 - 1974 die Mineralisation der Donauwässer bei der Stadt Russe bedeutend erhöht hat, was ein sicherer Hinweis ist für die Beeinflussung des natürlichen hydro-chemischen Regimes und des Verhältnisses zwischen den Einzelionen des Ionenbestandes als Folge der Verstärkung der Stromverunreinigung (1).

Aus Abb. 2 ist ersichtlich, daß sich der Ionenabfluß des Donaustroms zwar langsam, doch sicher innerhalb dieser 21 Jahre erhöht. Zum Prognostizieren der allgemeinen Mineralisation der Donauwässer wird nachstehende Originalmethodik angewandt: die vorliegenden Beobachtungen für 21 Jahre werden in drei gleiche Zeiträume aufgeteilt. Die Länge der einzelnen Zeiträume wurde im Hinblick auf die Tendenzen der zunehmenden Industrieentwicklung und der Erhöhung der Bevölkerungskonzentration im Einzugsgebiet des Donaustroms gewählt, d.h. mit den verschiedenen Intensitätsstufen der Verunreinigungsprozesse. Für den ersten Zeitraum 1954 - 1960 kann mit einer gewissen Bedingtheit angenommen werden, daß die Gewässer noch immer ihren natürlichen chemischen Bestand beibehalten haben oder daß die Verunreinigungsvorgänge so schwach sind, daß sie keinen wesentlichen Einfluß ausüben. Der zweite Zeitraum 1961 - 1967 wird als eine Übergangsperiode angesehen. Im dritten Zeitraum 1968 - 1974 bleibt der Trend der Zunahme der Verunreinigung unter dem Einfluß der zunehmenden Industrialisierung in den Donauländern erhalten. Wir erhalten für die drei Zeiträume drei Kurven (Abb. 2) mit folgenden Gleichungen:

$$\begin{array}{llll} \Sigma y_1 = 0,602 Q^{0,925} & - & \text{Zeitraum 1954 - 1960} & [1] \\ \Sigma y_2 = 0,776 Q^{0,905} & - & \text{Zeitraum 1961 - 1967} & [2] \\ \Sigma y_3 = 1,12 Q^{0,871} & - & \text{Zeitraum 1967 - 1974} & [3] \end{array}$$

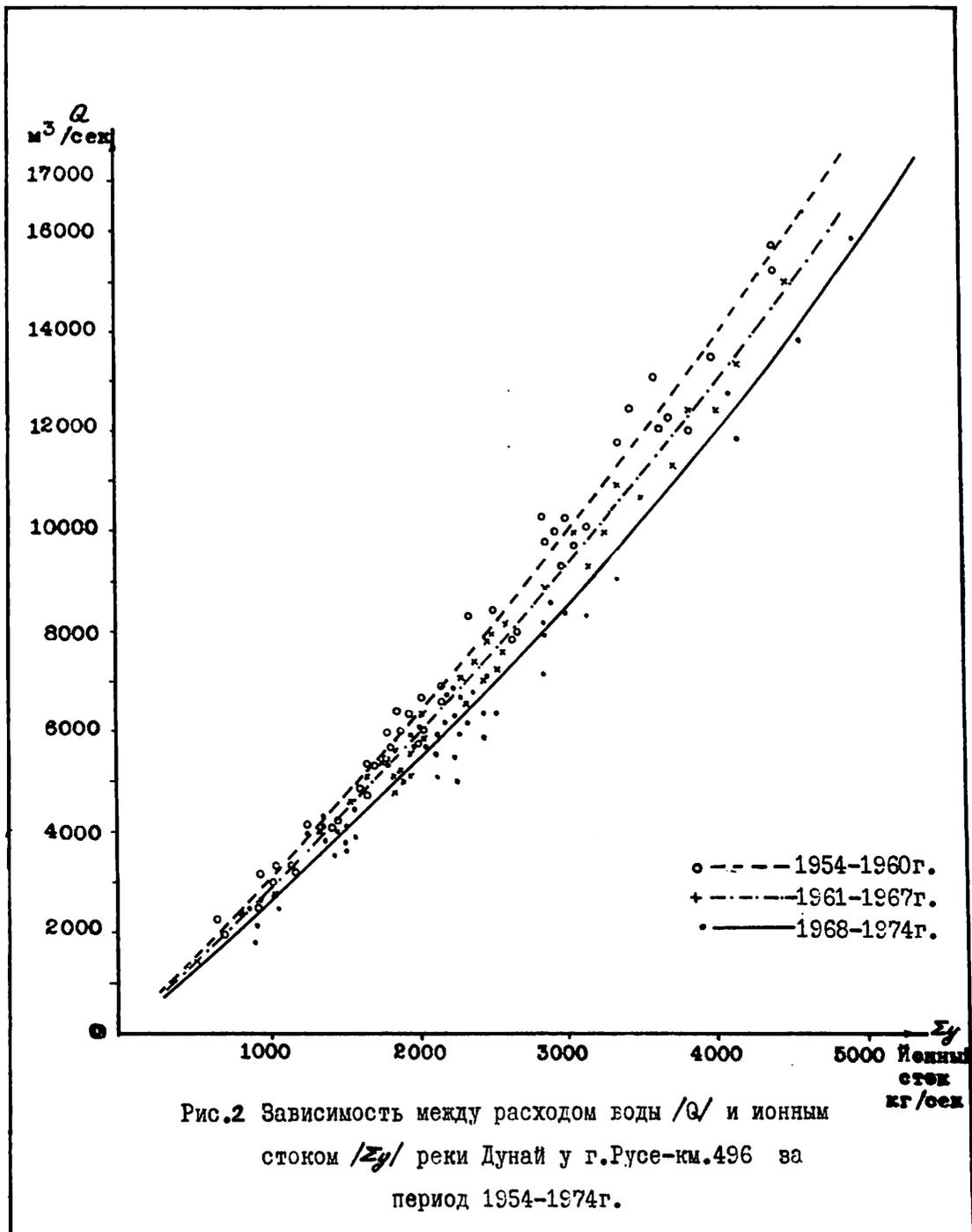


Abb. 2 Abhängigkeit zwischen der Wassermenge (Q) und dem Ionenabfluß ( $\Sigma y$ ) der Donau bei der Stadt Russe (km 496) für den Zeitraum 1954 - 1974.

Den Gleichungen [1, 2, 3] ist zu entnehmen, daß sich im Zeitraum 1954 - 1974 die Koeffizienten  $a$  und  $n$  nach absolutem Wert ändern. Wenn wir annehmen, daß der bisherige Trend des Anwachsens der Verschmutzung auch in Zukunft erhalten bleibt, so können die Koeffizienten  $a$  und  $n$  als quadratische Funktionen des verflossenen Zeitraumes, d.h.  $a = f(t)$  und  $n = f(t)$  in folgender Art dargestellt werden:

$$a = \alpha_1 + \alpha_2 t + \alpha_3 t^2 \quad [4]$$

$$n = \beta_1 + \beta_2 t + \beta_3 t^2 \quad [5]$$

Nach Lösung der Gleichung [ 4, 5 ] für die drei Zeiträume 1954 - 1960, 1961 - 1967 und 1967 - 1974 erhalten wir entsprechend die Koeffizienten a und n:

$$\begin{aligned} a &= 0,0009 t_0 + 0,002 t_0^2 + 0,576 & [6] \\ n &= -0,0007 t_0 + 0,0001 t_0^2 + 0,929 & [7] \end{aligned}$$

Dabei ist  $t_0 = 21 + t$ .

Die Gleichungen [ 6, 7 ] ermöglichen eine langfristige Prognose der Monats- und Jahresmittel der Mineralisation der Stromwässer bei einer gegebenen Wassermenge. Es ist dabei zu berücksichtigen, daß diese Abhängigkeit nur den  $d e n$  Punkt gilt, für den sie abgeleitet ist.

Mit Gleichung [ 6, 7 ] kann schätzungsweise auch der Trend in der Änderung der Einzelkomponenten des Ionenbestandes prognostiziert werden.

Abhängigkeiten dieser Art können auch für andere charakteristische Abschnitte des Donaustromes abgeleitet werden, für die man über langjährige hydrochemische Beobachtungen verfügt.

#### L i t e r a t u r h i n w e i s :

1. Iwanov, K.  
Russev, B. Verunreinigung der Donauwässer im bulgarischen Abschnitt nach ihren hydrochemischen saprobiologischen Kennwerten. Nachrichten des Instituts für Hydro-Meteorologie, Bd. XXIII, 1974.
2. Roshdestwenski, A. Möglichkeiten zum Prognostizieren des chemischen Bestandes und der Verunreinigungen der Wässer am Unterlauf der Donau. Materialien aus der VII. Konferenz für hydrologische Prognosen der Donau, Varna 1973.

FLUSSMORPHOLOGISCHE VERÄNDERUNGEN DER UNTEREN ISAR UND DEREN AUSWIRKUNG AUF DIE DONAU

K. Scheurmann

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ РУСЛА НИЖНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ИЗАР И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДУНАЙ

К. Шойрманн

Zusammenfassung:

Die Untere Isar war ursprünglich in zahlreichen Rinnen und verzweigte Flußarme aufgespalten. Erst mit der um 1860 begonnenen Korrektur wurde sie in ein festes Bett gezwungen. Als Folge davon setzten alsbald lebhaftere Umbildungsvorgänge ein, die ca. von Flußkilometer 74 an abwärts bis Flußkilometer 35 zu Eintiefungen, im Restabschnitt bis zur Mündung zu Anlandungen führten. Seit dem Wasserkraftausbau des oberen Teils 1948-56 mit 4 Stautufen ist der gesamte Isarunterlauf wegen des unterbrochenen Geschiebetriebes zur Erosionsstrecke geworden. Der Rückgang der Geschiebefracht wirkt sich allmählich auf die Sohlenverhältnisse der Donau im Mündungsbereich aus. Es wird aufgezeigt, welche Vorhersagen für die zu erwartenden morphologischen Veränderungen der Isar und Donau versucht worden sind und welche Grenzen der Zuverlässigkeit der Vorhersagen gesetzt sind.

Резюме:

Нижний Исар был первоначально расчленен на многочисленные каналы и разветвленные речные рукава. Лишь начатой в 1860 году корректировкой он был направлен в прочное русло. Как следствие этого тотчас же начались оживленные преобразования, которые привели к углублению реки приблизительно с 74-ого речного километра вниз до 35-ого речного километра, а на оставшемся участке до устья они привели к напывам. После застройки верховья реки энергоустановками с 4-мя ступенями запружения в 1948-56 годы все нижнее течение Исара превратилось, из-за нарушения движения донных наносов, в эрозионную полосу. Сокращение баласта донных наносов постепенно сказывается на подошвенных соотношениях в районе Дуная. Выясняется, какие прогнозы по ожидаемым морфологическим изменениям Исара и Дуная были испытаны и какие границы достоверности прогнозирования установлены.

1. Problemstellung

Jede Naturerscheinung ist ein fein geknüpftes Netz von Kausalketten und nur als solches der wissenschaftlichen Forschung zugänglich. Deren Aussagen sind umso zuverlässiger, je mehr der Einzelvorgang sich auf einfache Sätze, die Naturgesetze zurückführen läßt. Verdankt doch die Astronomie den erstaunlichen Genauigkeitsgrad ihrer Berechnungen der Tatsache, daß die Gegenstände ihrer Forschung, die Himmelskörper, als materielle Punkte im Sinne der Newtonschen Mechanik aufgefaßt werden können, die sich ungehemmt im fast leeren Raum bewegen. Wenn wir uns hingegen auf ein Forschungsgebiet begeben, das es mit einer unübersehbaren Fülle von Einzelpartikeln zu tun hat, stoßen streng deterministische Methoden bald an die Grenzen ihrer Anwendbarkeit.

In solcher Lage befindet sich der Hydrologe, der Vorhersagen über ein zukünftiges Ereignis, etwa den Pegelstand eines Flusses geben will. Hier gilt es zu wahrscheinlichkeitstheoretischen Verfahren zu greifen. Weitere Schwierigkeiten tun sich auf, wenn auf ein Phänomen Parameter einwirken, die nicht allein dem Gesetz der statistischen Vorgaben gehorchen, sondern in bestimmten Entwicklungsstadien andere Eigenschaften annehmen, oder dem Zugriff des Menschen unterliegen. Ein Beispiel speziell auf das Thema unserer Betrachtung bezogen: Wenn bei fortschreitender Sohlenerosion eines Flusses Schichten einer anderen geologischen Formation angeschnitten werden, wird sich der weitere Fortgang sprunghaft beschleunigen oder verzögern, je nach dem Verhältnis der Erosionsbeständigkeiten der anstehenden Materialien. Unter Umständen kann bei morphologischen Veränderungen ein schwer faßbarer Rückkopplungseffekt zur Geltung kommen, der die Güte von Vorhersagen noch zusätzlich einschränkt.

Der Hydrologe ist damit jedoch seiner Aufgabe nicht enthoben, Vorhersagen über die Gestaltungsvorgänge von Flüssen trotz aller Unsicherheiten zu versuchen. Ein Problem, das seit längerer Zeit aufmerksam verfolgt wird, ist die Umbildung der Unteren Isar und deren Auswirkung auf die Donau. Einige Gedanken darüber werden im Folgenden mitgeteilt.

## 2. Flußmorphologische Situation im Bereich der Unteren Isar

Der Lauf der Isar ist wie alle rechtsseitigen Donauzubringer aus den Alpen als eiszeitliche Schmelzwasser-  
rinne aufzufassen, die vermutlich über mindestens vier Vereisungsperioden hinweg den Abflüssen des Isar -  
Loisach - und Ammerseegletschers diente.

Die Limnischen Schichten des tertiären Unterbaues werden der Süßbrackwassermolasse zugerechnet, die den  
Übergang der Oberen Meeresmolasse zur überlagernden Oberen Süßwassermolasse darstellt. Sie bilden eine  
wechselhafte Serie verzahnter Lagen aus glimmerreichen Feinsanden, Mergeln und Feinkiesen. Ober der ter-  
tiären Unterlage besteht eine quartäre Auffüllung aus spät- und postglazial in mehreren Phasen geschütete-  
ten Kiesen, die sich zu einem Terrassenbau ordnen.

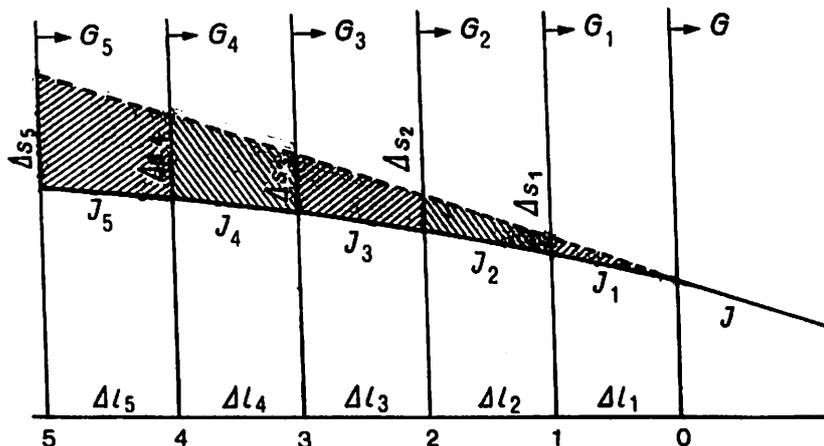
Zwischen Landshut (Flußkilometer 74) und etwa Oberpörling (Flußkilometer 18) hat sich das rd. 5 km breite  
Isartal tief in das Tertiärhügelland eingesenkt. Seit dem Rückgang des Abflusses in der Nacheiszeit zog  
sich die Isar auf einen verhältnismäßig schmalen Bereich entlang des rechten Talrandes zurück. In der Mitte  
des 19. Jahrhunderts, bevor die Korrektur einsetzte, war das Wildwasserbett auf rd. 1 000 m Breite zu-  
sammengeschrunpft.

Als Folge der 1860 begonnenen Korrektur zeigten sich alsbald lebhafte Umbildungsvorgänge, die grob ge-  
sprochen von Landshut abwärts bis etwa Flußkilometer 35 zu Eintiefungen, im Restabschnitt bis zur Mündung  
in die Donau zu Anlandungen führten. Während man im oberen Teil der Sohlenerosion schon 1912 durch den Bau  
eines Stützwehres bei Flußkilometer 70,4 begegnete, wurde im Mündungsbereich zunächst mit bescheidenem Er-  
folg versucht die Auflandungen durch Kiesbaggerungen in Grenzen zu halten. Von 1947 an wurden die Kiesent-  
nahmen erheblich gesteigert und fast bis Flußkilometer 40 hinauf fortgesetzt. Wenig später begann der Was-  
serkraftausbau der Unteren Isar mit vier Staustufen zwischen Landshut und Dingolfing (Flußkilometer 45).  
Der Abschluß dieses Unternehmens 1956 markiert den Beginn eines neuen Abschnittes der Flußgeschichte, ha-  
ben sich doch die Umbildungsvorgänge seither stark beschleunigt. Kein Wunder, denn der Geschiebetrieb kam  
durch die Stauwerke völlig zum Erliegen, so daß die Isar gezwungen ist ihr ungesättigtes Transportvermögen  
durch Feststoffaufnahmen aus der Flußsohle auszulasten. Unterhalb der letzten Stufe ist deshalb in kurzer  
Zeit ein Eintiefungskeil entstanden, der seine Spitze schon weit in den ehemaligen Auflandungsbereich hi-  
nein vorgeschoben hat. Bei dieser Sachlage lag es nahe, Vorhersagen über die weitere Entwicklung des Fluß-  
bettes zu treffen.

## 3. Berechnungsverfahren

Für die theoretische Vorhersage der Sohleneintiefung (analog auch der Auflandung) eignet sich grundsätz-  
lich jedes der gebräuchlichen Berechnungsverfahren für den Geschiebetrieb, vorausgesetzt, daß die Sohle  
bis in größere Tiefe einen homogenen Aufbau besitzt. Bekanntlich ist der Geschiebetrieb eine Funktion der  
Abflüsse oder Wasserstände. Da Einzelereignisse in ihrer zeitlichen Abfolge nicht vorhersehbar sind, muß  
man sich auf statistische Durchschnittswerte stützen. Daraus folgt, daß Aussagen über künftige Sohlenum-  
bildungen immer nur wahrscheinlichkeitstheoretischen Charakter haben und nur dann einigermaßen vertrauens-  
würdig sein können, wenn sie sich über genügend lange Zeiträume erstrecken. Am besten bedient man sich des  
von SCHOKLITSCH (5) angegebenen Verfahrens, mit dem die Eintiefung unterhalb von Stauanlagen auf iterati-  
vem Weg berechnet werden kann.

Es wird von einem vorerst noch unbekanntem Querschnitt  $Q$  flußab der Stauanlage ausgegangen, in dem eben  
keine Sohleneintiefung mehr auftritt, d.h. Geschiebefracht  $G$  und Transportvermögen halten sich die Waage.  
Die ankommende Geschiebefracht ist gleich dem Masseninhalt des Erosionskeiles. Die Berechnung wird solange  
verbessert, bis die Summe der Teilfrachten der Gesamtfracht im unbeeinflussten Bereich entspricht.



Für den Sohlenabtrag im Abschnitt zwischen den Profilen 0 und 1 gilt:

$$\Delta G_1 = G - G_1 = \frac{1}{2} \Delta l_1 \cdot \Delta s_1 \cdot B$$

und

$$\Delta s_1 = \Delta l_1 \cdot (J - J_1)$$

daraus folgt

$$\Delta l_1 = 2 \cdot \frac{G - G_1}{\Delta s_1 \cdot B} = \sqrt{2 \cdot \frac{G - G_1}{(J - J_1) \cdot B}}$$

In allgemeiner Form gelten die Gleichungen

$$\Delta s_n = \Delta s_{n-1} + \Delta l_n (J - J_n)$$

$$\Delta l_n = 2 \cdot \frac{G_{n-1} - G_n}{(\Delta s_{n-1} + \Delta s_n) \cdot B}$$

Die Iteration kann abgebrochen werden, wenn

$$\sum \Delta G = G$$

Zur Berechnung von  $G$  bedient man sich zweckmäßig der bekannten Methoden von SCHOKLITSCH oder MEYER-PETER (5,3).

#### 4. Berechnungsergebnisse und tatsächliche Sohlenumbildung

Mit Hilfe des skizzierten Verfahrens hat RICHTER (4) den Eintiefungsfortgang der Isar unterhalb Dingolfing (Flußkilometer 45) für die Zeit vom 1.2.1957 - 30.11.1960 und vom 1.12.1960 - 31.7.1963 untersucht. Die Länge des Erosionskeiles errechnete er unter den getroffenen Annahmen im ersten Fall zu 11, im zweiten zu 7 km. Die maximale Eintiefung beträgt dabei 2,08 bzw. 1,34 m. Daraus folgt für den ganzen Zeitraum von 1957 - 1963 als Jahresmittel

$$0,52 \text{ m/a.}$$

Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem tatsächlichen Erosionsverlauf bis 1963, so zeigt sich, daß die größte

Eintiefung nur ungefähr zwei Drittel des berechneten Wertes erreichte, der Erosionskeil sich hingegen weiter als angenommen flußabwärts ausgeweitet hat. Die Ursache mag in der natürlichen Panzerung der Eintiefungsstrecke durch Kornaussortierung zu suchen sein, die vorübergehend die Sohlenerosion etwas abgeschwächt hat. Nachdem seit dem Abschluß der Untersuchungen RICHTERS nunmehr 12 Jahre vergangen sind, wäre zunächst zu fragen, inwieweit seine Vorhersagen sich mit der Entwicklung bis zur Gegenwart decken. Ein Blick auf den Flußlängsschnitt und die zugehörigen geologischen Profile belehrt uns jedoch, daß der prognostizierte Eintiefungsfortschritt spätestens 1965 fragwürdig geworden ist, denn das Julihochwasser dieses Jahres hat die alluviale Deckschicht auf mehrere Kilometer Länge fast ganz abgeräumt und die tertiäre Unterlage freilegt. Die in der Beobachtung vorausgesetzte Homogenität der Sohle besteht seither nicht mehr.

Der zutage getretene Flinz zeigt keineswegs einheitliche Erosionsbeständigkeit, sondern wird einmal rascher, einmal langsamer abgetragen, je nachdem ob sandige oder mergelige Bildungen vorherrschen. Mergelbänke wirken mitunter wie erosionshemmende Grundschwellen, bis sie vom Wasser durchnagt werden und dann zusammenbrechen. Bei bisher zwei Hochwassern - 1965 und 1970 - konnte beobachtet werden, daß die mittlere Sohle in nur wenigen Tagen bei jeweils rd.  $300\,000\text{ m}^3$  Abtrag auf etwa 4 km Länge um je rd. einen Meter abgesunken ist, während in der übrigen Zeit nur geringe Änderungen stattgefunden haben.

Angesichts dieser Massenbewegungen läge die Vermutung nahe, der Unterlauf der Isar müßte durch erhebliche Anlandungen gekennzeichnet sein. Das trifft aber nicht zu. Im Gegenteil, der Tiefenschurf greift allmählich auch auf den Bereich über, der früher unter Massenüberschuß zu leiden hatte. Die Erklärung liegt auf der Hand: Aus der Erosionsstrecke wird viel weniger Kies als feinkörniges Flinzmaterial verfrachtet, das vorwiegend als Schweb bis zur Donau wandert und in der Geschiebebilanz der Isar überhaupt nicht zu Buche schlägt.

Unter solchen Voraussetzungen sind rechnerisch begründete Aussagen über künftige morphologische Veränderungen schwierig, zumal ja ein Fluß mit so bedenklicher Eintiefung kaum sich selbst überlassen bleiben kann und das Wechselspiel zwischen Erosion und Flußinstandhaltung berücksichtigt werden muß. In aller Regel wird man zu einer grob indeterministischen Betrachtungsweise Zuflucht nehmen, wobei die Qualität der Vorhersage nicht wenig von der Erfahrung und dem Geschick des Bearbeiters abhängen dürfte.

##### 5. Einflüsse auf die Donau

Nach Untersuchungen von ERTL (2) und BAUER (1) hat die Isar früher im Jahresmittel rd.  $90\,000\text{ m}^3/\text{a}$  Geschiebe in die Donau transportiert, das war etwa das Doppelte der ankommenden Geschiebefracht der Donau. Als Folge dieses beträchtlichen Geschiebeeinstoßes hat sich im Mündungsbereich über lange Zeiträume ein mächtiger Schwemmkegel aufgebaut, der einen Gefällsbruch der Donau bewirkt. Während das Gefälle oberhalb der Mündung (Donaukilometer 2 281,7) weniger als  $0,1\text{ ‰}$  beträgt, wächst es unterhalb auf rd.  $0,4\text{ ‰}$  an. Bis vor einigen Jahren übertraf die gesamte Geschiebezufuhr das Transportvermögen der Donau, so daß der Schwemmkegel weiter langsam aufwuchs. Aus Gründen des Hochwasserschutzes und vor allem auch der Schifffahrt erwies es sich als notwendig, die Fahrwasserrinne wiederholt auszubaggern. Soweit die verfügbaren Zahlen sichere Aussagen gestatten, wurden allein zwischen Deggendorf und der Isarmündung seit der Jahrhundertwende über  $2 \cdot 10^6\text{ m}^3$  Kies entnommen. Trotzdem ist der Mittelwasserstand (zehnjährige übergreifende Mittel) bei Deggendorf von 1900 - 1940 zunächst um 57 cm gestiegen und von 1940 - 1960 um 25 cm gefallen (1).

Mit fortschreitendem Ausbau der Donau zur Großschiffahrtsstraße wird der Geschiebetrieb stark zurückgehen. Gleichzeitig muß damit gerechnet werden, daß die Isar wegen der sich anbahnenden Erschöpfung der Kiesvorräte schon jetzt keine  $90\,000\text{ m}^3$  Geschiebe mehr zur Donau entsendet und künftig noch weniger zum Geschiebehaushalt der Donau beisteuern wird. Der Schwemmkegel im Donautal wird daher nicht mehr ausreichend ergänzt und ist im Begriff sich weiter langsam abzubauen. Einige Niedrigwasserstände seit 1948 bei vergleichbaren Abflüssen mögen die Situation beleuchten:

		Datum und Abfluß am Pegel Schwabelweis (m <sup>3</sup> /s)			
Ort	(Flußkilometer)	12.10.48	4.9.59	20.10.69	12.9.73
		186	202	202	195
Kleinschwarzach	(2 292,6)	136	132	114	110
Deggendorf	(2 284,6)	243	239	210	216
Halbmeile	(2 280,3)	143	132	109	117
Niederaltlach	(2 276,2)	270	254	216	228

Die fallende Tendenz der Pegelstände ist selbstverständlich nicht allein auf natürliche morphologische Veränderungen zurückzuführen, sondern auch auf flußbauliche Maßnahmen. Insofern wäre es gewagt zu glauben, es müsse sich der Tiefenschurf ähnlich wie in der jüngeren Vergangenheit in gleicher Weise, d.h. etwa mit 1 cm/a, in der Zukunft fortsetzen. Man wird vielmehr davon ausgehen dürfen, daß die Donau aufgrund der Korngrößenverteilung ihres Sohlenmaterials im geschiebelosen Zustand als Extremfall einem theoretischen Endgefälle von knapp 0,2 ‰ zustreben würde. Soweit kommt es aber sicher nicht, denn bevor der Geschiebezustrom versiegt, wird aller Voraussicht nach der Staustufenausbau der Donau längst abgeschlossen sein.

Soll abgeschätzt werden, wie sich die Donausohle unterhalb einer neu errichteten und von unten her noch nicht eingestauten Stufe eintiefen wird, empfiehlt es sich in erster Näherung von einem prismatischen Erosionskeil auszugehen, dessen Volumen dem Geschiebetransportvermögen entspricht. Die größte Unsicherheit steckt dabei - die Untersuchungen RICHTERS an der Isar bestätigen das - in der richtigen Längenannahme der Sättigungsstrecke. Legt man nach ERTL für die Donau rd. 45 km erforderliche Sättigungsstrecke zugrunde, errechnen sich bei 70 m Gerinnebreite und schätzungsweise 90 000 m<sup>3</sup>/a Transportvermögen (oberhalb der Isarmündung) als mittlerer Eintiefungsfortschritt

$$\frac{2 \cdot 90\,000 \cdot 100}{45\,000 \cdot 70} = \text{rd. } 6 \text{ cm/a,}$$

eine Zahl, die plausibel erscheint. Das Ergebnis für Vorhersagen über längere Zeitabschnitte zu benützen wäre nicht ratsam und allein schon deshalb verfehlt, weil das Transportvermögen eine Funktion der zunehmenden Wassertiefe ist und mit dieser anwächst.

Diese kurzen Ausführungen machten deutlich, auf welchem schwankenden Boden man sich beim Versuch begibt, morphologische Änderungen eines Flusses vorherzusagen. Trotz aller Unsicherheiten werden aber vom Hydrologen immer wieder brauchbare Prognosen erwartet werden. Mit statistischen Betrachtungen allein ist es meistens nicht getan. Mehr noch als in anderen Zweigen der Gewässerkunde kommt es bei morphologischen Vorhersagen darauf an, einen Fluß in seiner Verflochtenheit zwischen den natürlichen Gestaltungskräften und dem Wirken des Menschen zu begreifen.

#### L i t e r a t u r h i n w e i s e:

1. Bauer, F. Der Geschiebehaushalt der bayerischen Donau im Wandel wasserbaulicher Maßnahmen. Die Wasserwirtschaft, H. 4 und 5, 1965
2. Ertl, O. Gestaltungsvorgänge in der Isar unterhalb Landshut. Gutachten 1957 (unveröffentlicht)
3. Meyer-Peter, E. Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes. Schweiz.Bauzeitung, H. 3, Zürich 1949
4. Richter, W. Zur Flußbettumbildung unterhalb von Flußkraftwerken. Dissertation TU Berlin, 1964
5. Schoklitsch, A. Handbuch des Wasserbaus. Wien 1950



ERGEBNISSE DER STAURAUMVERLANDUNG DES INN

H. Ahammer

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБМЕЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА НА РЕКЕ ИНН

X. Ахаммер

Zusammenfassung:

Bei der Kraftwerkskette des Inn wurde festgestellt, daß sich das Verlandungsproblem am zweckmäßigsten durch Anlage von Geschiebefallen beherrschen läßt, in denen die größeren Körnungen dem eigentlichen Stauraum ferngehalten werden. Unter der Voraussetzung, daß dies geschieht, unterliegen die Umbildungsvorgänge in den Stauräumen weniger den Gesetzen des Geschiebetriebes als denen der Klärwirkung von Absatzbecken. Die Klärwirkung ( $\beta$ ) wird durch das aus Flußaufnahmen und Schwebstoffmessungen feststellbare Volumenverhältnis zwischen Anlandung ( $V_A$ ) und gesamter Schwebstofffracht ( $V_S$ ) ausgedrückt.

$$\beta = \frac{V_A}{V_S}$$

Der zurückgehaltene Anteil ( $\beta$ ) und der in das Unterwasser abgeführte Anteil ( $\epsilon$ ) entsprechen jeweils der Gesamtmenge von 100 % und ergeben somit zusammen den Wert 1:

$$\beta + \epsilon = 1$$

Für den in das Unterwasser abgeführten Anteil ( $\epsilon$ ) wurde festgestellt, daß er durch das Größenverhältnis ( $l$ ) zwischen dem im Gleichgewichtszustand verbleibenden Reststauraum ( $J_R$ ) und dem jeweils vorhandenen Stauräumeninhalt ( $J_i$ ) bestimmt wird:

$$\epsilon = \frac{J_R}{J_i}$$

Im Gleichgewichtszustand ist  $J_i = J_R$  bzw.  $J_R/J_i = 1$  und damit auch  $\epsilon = 1$  bzw.  $\beta = 0$ .

Das jeweilige Stauraumvolumen ( $J_i$ ) entspricht dem Stauräumeninhalt bei Einstau ( $J_E$ ) abzüglich der Summe der Anlandungen ( $\sum V_A$ ), es ist also

$$J_i = J_E - \sum V_A$$

Für die jeweils zu erwartende Anlandung ( $V_A$ ) läßt sich nach den vorstehenden Ausführungen folgende Beziehung aufstellen:

$$\begin{aligned} V_A &= \beta \cdot V_S = (1 - \epsilon) \cdot V_S \\ &= \left[ 1 - \left( \frac{J_R}{J_E - \sum V_A} \right)^n \right] \cdot V_S \end{aligned}$$

Es handelt sich hier um eine Differenzialgleichung der Form

$$y' = \left[ 1 - \left( \frac{J_R}{J_E - y} \right)^n \right] \cdot V_S$$

Das Integral dieser Gleichung lautet für  $n = 1$ :

$$y + J_R \cdot \left[ \ln (J_E - J_R) - \ln (J_E - J_R - y) \right] = V_S \cdot x$$

$y$  wird in Volumeneinheiten,  $x$  in Zeiteinheiten und der Schwebstoffanfall  $V_S$  in Volumeneinheiten pro Zeiteinheit ausgedrückt.

Der Inhalt des Teststauraumes ( $J_R$ ) hängt ab von der Länge des Stauraumes und der Größe des Restquerschnittes, letzterer wieder von der Wasserführung und der Schwebstoffbelastung.

Die Größe des Reststauraumes wird durch den Restquerschnitt am Wehr charakterisiert.

Um Flußstrecken unterschiedlichen Abflusses ( $Q$ ) miteinander vergleichen zu können, wurde den Vergleichsuntersuchungen nicht  $Q$  selbst, sondern die Abflußbelastung pro m Bettbreite ( $q$ ) und dementsprechend auch statt der Fläche die mittlere Tiefe ( $t_M$ ) zugrunde gelegt. Örtliche Einflüsse und nur in unmittelbarer Wehrnähe wirksame Sohlenveränderungen wurden jeweils durch Mittelbildung über die unteren 3 km des Stauraumes ausgeschaltet. Die so erhaltenen Werte ergaben eine Proportionalität zwischen  $q$  und  $t_M^{7/6}$ , was besagt, daß das Verhältnis  $q/t_M^{7/6}$  innerhalb der Kraftwerkskette für einen bestimmten Abfluß jeweils einen konstanten Wert darstellt.

$$\frac{q}{t_M^{7/6}} = a$$

Für den Abfluß 2 Mq, bei dem im Gleichgewichtszustand etwa der Sohlenabtrag beginnt, wurde ein Wert  $a = 0,75$ , für das mittlere Jahreshochwasser MHQ ein Wert  $a = 1,35$  festgestellt.

Unter Zugrundelegung der Abflußgleichung nach Strickler

$$\frac{q}{t_M^{7/6}} = a = k \cdot (t_M \cdot J)^{1/2}$$

drückt der Exponent 7/6 aus, daß der Gleichgewichtszustand der Sohle durch jeweils gleiche Schleppspannungen bestimmt wird.

Je mehr sich die Verlandung dem Gleichgewichtszustand nähert, desto mehr wirken sich Abweichungen des Abflußgeschehens, d.h. der durch MQ charakterisierten Jahreswasserführung vom langfristigen Mittelwert MMQ und des Jahreshochwasser HQ von MHQ aus. Der Wert für den Reststauraum  $J_R$  muß daher noch mit einem Faktor  $(MQ/MMQ \cdot HQ/MHQ)^m$  ergänzt werden.

Die Verlandungsgleichung erhält dann die Form

$$V_A = \left[ 1 - \left( \frac{J_R}{J_E - \sum V_A} \cdot \frac{MQ}{MMQ} \cdot \frac{HQ}{MHQ} \right)^m \right]^n \cdot V_S$$

Der Exponent  $m$  ist abhängig vom Grad der Verlandung, der sich im Wert

$$l = \frac{J_R}{J_E - \sum V_A}$$

ausdrückt. Da Hochwässer den Verlandungsvorgang zunächst fördern, bei Annäherung an den Gleichgewichtszustand aber räumend wirken, schwankt  $m$  zwischen einem negativen und positiven Grenzwert, der etwa bei 1/2 liegt:

$$m = l - 0,5$$

Unter der Voraussetzung, daß mit den Messungen tatsächlich die gesamte Schwebstofffracht ( $V_S$ ) erfaßt wird, ist  $n = 1$ . Eine unvollständige Erfassung der Schwebstoffe führt zu relativ großen  $\beta$ - und kleinen  $\epsilon$ -Werten; zum Ausgleich muß in solchen Fällen  $n > 1$  gesetzt werden.

Die vorliegenden Gleichungen wurden aus den Umbildungsvorgängen in sogenannten Kopfstufen abgeleitet, auf die - abgesehen vom zurückgehaltenen Geschiebe - die gesamte Feststofffracht des Flusses zukommt.

Komplizierter ist der Verlandungsvorgang der Unterlieger. Ihre Stauräume bilden im Anfangsstadium der Verlandung eine Einheit mit dem Stauraum des Oberliegers, da sie zunächst selbst bei Hochwasser nur relativ feines Material erhalten. Mit zunehmender Verlandung der Oberlieger gelangen vor allem bei größeren Hochwässern gröbere, d.h. anlandungsfreudigere Feststoffe in die unterhalb gelegenen Stauräume. Dies führt dazu, daß sich der Verlandungsvorgang und damit auch der Gleichgewichtszustand der Unterlieger allmählich dem einer Kopfstufe nähert.

### Резюме:

На электростанциях расположенных на реке Инн установлено, что проблемы обмеления можно решать более целесообразно с помощью сооружения ловушки для наносов, которые не пропускают крупную породу к собственному водохранилищу. При условии, что крупная порода будет задержана, процессы переобразования в водохранилище будут соответствовать не столько закону перемещения донных наносов сколько закону осветления в бассейне отложений. Влияние осветления ( $\beta$ ) выражается отношением объема между осаждением ( $V_A$ ) и общим расходом взвешенного вещества ( $V_S$ ), которое можно установить с помощью съёмов реки и измерений взвешенного вещества.

$$\beta = \frac{V_A}{V_S}$$

Задержанная доля ( $\beta$ ) и поступившая в подпочвенную воду доля ( $\epsilon$ ) соответствует каждый раз общей массе, составляющей 100%, и этим самым их сумма равна значению 1:

$$\beta + \epsilon = 1$$

Для доли ( $\epsilon$ ), поступившей в нижний бьеф установлено, что она определяется отношением величины ( $l$ ) между остальной частью (которая не подвергнута обмелению) площади водохранилища  $IR$ , остающейся в состоянии равновесия, и соответственно имеющейся ёмкостью водохранилища ( $J_i$ ):

$$\epsilon = \frac{J_R}{J_i}$$

В состоянии равновесия  $J_i = J_R$  или  $J_R/J_i = 1$ , а этим самым также  $\epsilon = 1$  или  $\beta = 0$ .

Соответственный объем водохранилища ( $J_i$ ) соответствует вместимости водохранилища при создании подпора ( $J_E$ ) за вычетом суммы осаджений ( $\sum V_A$ ), и так получается следующее уравнение:

$$J_i = J_E - \sum V_A$$

Согласно выше рассмотренным выводам для соответственно ожидаемых осаджений ( $V_A$ ) можно получить следующее отношение:

$$\begin{aligned} V_A &= \beta \cdot V_S = (1 - \epsilon) \cdot V_S \\ &= \left[ 1 - \left( \frac{J_R}{J_E - \sum V_A} \right)^n \right] \cdot V_S \end{aligned}$$

Здесь речь идет о дифференциальном уравнении следующего вида:

$$y' = \left[ 1 - \left( \frac{J_R}{J_E - y} \right)^n \right] \cdot V_S$$

Интеграл этого уравнения равен для  $n = 1$ :

$$y + J_R \cdot \left[ \ln (J_E - J_R) - \ln (J_E - J_R - y) \right] = V_S \cdot x$$

причем  $y$  выражается в единицах объема,  $x$  - в единицах времени и скопление взвешенного вещества ( $V_S$ ) - в единицах объема на единицу времени.

Вместимость части водохранилища (не подвергнутой обмелению) ( $I_R$ ) зависит от длины водохранилища и величины поперечного сечения этой части водохранилища, причем опять таки зависит от водности и от нагрузки взвешенного вещества.

Величина части водохранилища (не подвергнутой обмелению), характеризуется поперечным сечением у плотины.

Для того, чтобы сделать возможным сравнение отрезков реки с различными стоками ( $Q$ ) в основу сравнительных исследований были положены не  $Q$ , а нагрузка стока на ширины русла ( $q$ ) и соответственно этому также вместо площади - среднюю глубину ( $t_M$ ). С помощью осреднения в нижних трех километрах водохранилища были исключены местные влияния и изменения русла, происходящие в непосредственной близости у плотины. Полученные таким образом значения имеют пропорциональность между  $q$  и  $t_M^{7/6}$ , а это означает, что отношение  $q/t_M^{7/6}$  в каскаде электростанций является соответственно постоянным значением для определенного стока.

$$\frac{q}{t_M^{7/6}} = a$$

Для стока 2 М, при котором примерно в состоянии равновесия начинается снесение дна, установлено значение  $a = 0,75$ ; для среднего годового расхода воды на метр ширины русла -  $a = 1,35$ .

Если положить в основу уравнение стока Штриккера

$$\frac{q}{t_M^{7/6}} = a = k \cdot (t_M \cdot J)^{1/2}$$

то экспонент  $7/6$  говорит о том, что состояние равновесия дна определяется соответственно влекущими силами.

Чем больше обмеление принимает состояние, тем большее действие оказывают отклонения стока, т. е. отклонения годовой водности, характеризуемой средним расходом воды  $MQ$ , от долгосрочного среднего значения  $MMQ$  и отклонения годового максимального расхода  $HQ$  от среднего максимального расхода  $MHQ$ . Поэтому значение части водохранилища (не подвергнутой обмелению)  $I_R$  надо дополнить еще одним фактором  $MQ/MMQ \cdot /MHQ/$ .

Уравнение обмеления принимает следующий вид:

$$V_A = \left[ 1 - \left( \frac{J_R}{J_E - \sum V_A} \cdot \frac{MQ}{MMQ} \cdot \frac{HQ}{MnQ} \right)^m \right]^n \cdot V_S$$

Экспонент  $m$  зависит от степени обмеления, которая выражена значением  $l = \frac{J_R}{J_E - \sum V_A}$ , так как паводки сначала содействуют процессу обмеления, а затем однако же при достижении состояния равновесия - углублению.  $m$  колеблется между положительной и отрицательной предельной величиной, равной примерно  $1/2$ ;  $m = 1 - 0,5$ .  $n = 1$  при том условии, если в измерения включено все перецеваемое взвешенное вещество ( $V_S$ ). При неполном учете взвешенного вещества получаются большие значения  $\beta$ -и небольшие значения  $\epsilon$ . В таких случаях для компенсации надо принимать  $n > 1$ .

Имеющиеся уравнения выводятся из процессов переобразования в так называемых головных ступенях, к которым, кроме задержанной породы, поступает весь твердый расход реки.

Процесс обмеления намного сложнее в нижних районах реки. Процессы, происходящие в начальной стадии обмеления водохранилищ в этих районах соответствуют процессам в водохранилищах, расположенных вверх по течению, так как при паводках в них поступает сначала лишь относительно мелкий материал. С возрастающим обмелением верхних водохранилищ при паводках в нижние водохранилища поступают более крупные или более "склонные" к отложению твердые вещества. Это приводит к тому, что процессы обмеления, а этим самым и состояние равновесия в водохранилищах, расположенных вниз по течению, постепенно протекают так же как и в головных ступенях.

Die außergewöhnlich hohe Schwebstoffbelastung des Inn, die in einer spezifischen Schwebstoffführung von etwa 0,2 % des Abflusses zahlenmäßig zum Ausdruck kommt, führte zu einer Verlandung der Stauräume, die den erwarteten Umfang weit überschritt und eine beträchtliche Anhebung der Stauspiegelhöhen über das berechnete Maß zur Folge hatte. Da Staubeckenspülungen, abgesehen von dem empfindlichen Energieverlust, nur sehr befristeten Erfolg hatten, zwang dies am Inn mehr als an anderen Flüssen dazu, sich intensiv mit den Fragen der Stauräumverlandung zu beschäftigen. Es wurden Lösungen gesucht und gefunden, die in weitgehend verlandeten Stauräumen beobachtete Sohle als zu erwartende "Gleichgewichtssohle" im voraus zu berechnen. Anhand von Flußprofilaufnahmen bei Hochwasser wurde die Räumwirkung größerer Hochwässer ermittelt und damit die Voraussetzung geschaffen, auch die "Hochwassersohle" zu berechnen, die wieder der Berechnung der Wasserspiegelhöhen beim Ablauf eines Katastrophenhochwassers zugrundegelegt wurde. Offen blieb noch die Frage, wie sich die Verlandung langfristig entwickelt. Ihre Beantwortung setzt in besonderem Maße eine sich über längere Zeit erstreckende Beobachtung voraus (Abb. 1). Über das Ergebnis dieser Untersuchungen wird im Folgenden berichtet.

Vorauszuschicken ist noch, daß die Frage des Geschiebeproblems wegen der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit ausgeklammert werden mußte. Es spielt bei den besprochenen Untersuchungen eine untergeordnete Rolle, weil die Geschiebefracht nur knapp 5 % der Schwebstofffracht ausmacht und das Geschiebe des Inn und der Salzach jeweils an der Stauwurzel der obersten Stufe durch Baggerung entfernt wird. Den untersuchten Gleichgewichtsbedingungen liegt daher die Voraussetzung zugrunde, daß gröbere Körnungen vom eigentlichen Stauraum ferngehalten werden. Dies führt weiter dazu, daß die Umbildungsvorgänge weniger den Gesetzen des Geschiebetriebs als denen der Schwebstoffbewegung in Absetzbecken folgen.

Die Klärwirkung ( $\beta$ ) wird durch das aus Flußaufnahmen und Schwebstoffmessungen feststellbare Volumenverhältnis zwischen Anlandungen ( $V_A$ ) und gesamter Schwebstofffracht ( $V_S$ ) ausgedrückt.

$$\beta = \frac{V_A}{V_S}$$

Der zurückgehaltene Anteil ( $\beta$ ) und der in das Unterwasser abgeführte Anteil

$$\epsilon = \frac{V_S - V_A}{V_S}$$

entsprechen jeweils der Gesamtmenge von 100 % und ergeben somit zusammen den Wert 1:

$$\beta + \epsilon = 1$$

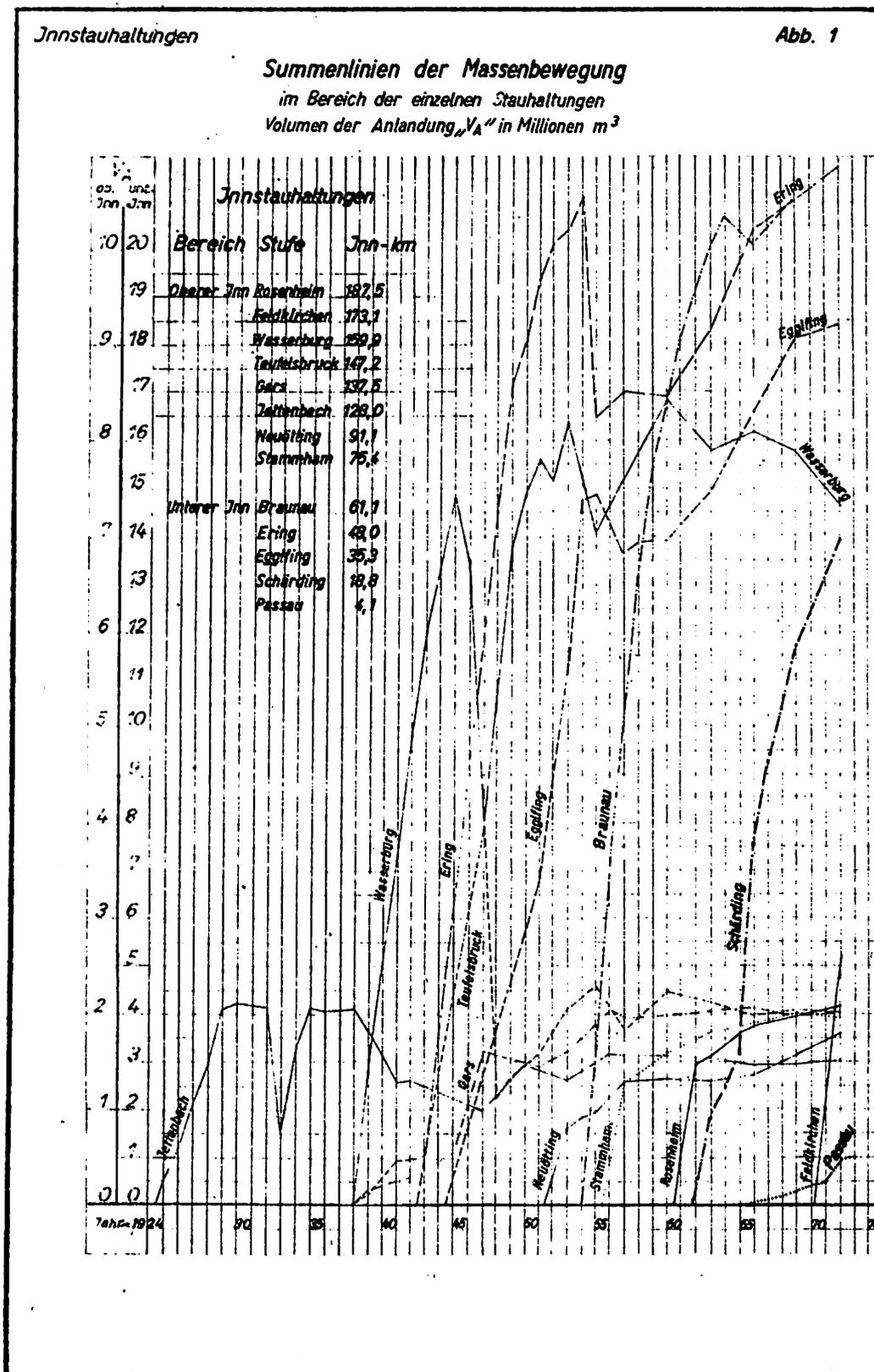


Abb. 1 Summenlinie der Veränderung in den Stauhaltungen des Inn

Die Menge der zur Ablagerung gelangenden Schwebstoffe ist nach den Gesetzen der Klärwirkung eine Funktion der Korngröße, des Verhältnisses zwischen Sink- und Fließgeschwindigkeit und der Länge des für das Absetzen zur Verfügung stehenden Weges. Über die vom Abflußquerschnitt abhängige Fließgeschwindigkeit gehen neben der Länge auch Breite und Tiefe des Stauraums als maßgebende Größen in den Ablauf des Verlandungsvorganges ein. Da Länge und Breite eines Stauraums im allgemeinen konstant sind, bleibt die Veränderung der

Tiefe bzw. das Verhältnis zwischen der Resttiefe  $t_R$  des Gleichgewichtszustands und der jeweils vorhandenen Tiefe  $t$  als maßgebendes Kriterium für die Aufnahmefähigkeit eines Stauraums.

Bei Erreichung des Gleichgewichtszustandes, der durch die Bedingung  $\epsilon = 1$  bzw.  $\beta = 0$  definiert ist, wird  $t = t_R$  und damit auch das Verhältnis  $t_R : t = 1$ . Von dieser Grenzbedingung ausgehend setzen wir

$$\epsilon = \frac{t_R}{t}$$

Indem wir auch die Länge und Breite in die Betrachtung mit einbeziehen, erhalten wir statt der Resttiefe ( $t_R$ ) den Reststauraum ( $J_R$ ) und statt  $t$  den jeweiligen Staurauminhalt ( $J$ ) als Vergleichsgrößen und die Verhältniszahl

$$l = \frac{J_R}{J}$$

Eine Gegenüberstellung von  $\epsilon$  und  $l$  (Abb. 2) zeigt, daß eine Proportionalität besteht und mit hinreichender Genauigkeit

$$\epsilon = l$$

gesetzt werden kann. Der jeweilige Staurauminhalt ( $J$ ) ist der Differenzbetrag zwischen dem Staurauminhalt zum Zeitpunkt des Einstaues ( $J_E$ ) und der Summe der Anlandung ( $\Sigma V_A$ )

$$J = J_E - \Sigma V_A$$

Daraus ergibt sich

$$\epsilon = \frac{J_R}{J_E - \Sigma V_A}$$

Die Klärwirkung bzw. der zur Ablagerung gelangende Anteil der Anlandungen ist

$$\beta = 1 - \epsilon = 1 - \frac{J_R}{J_E - \Sigma V_A}$$

Die in dieser Gleichung enthaltene Aussage über die Entwicklung des Verlandungsvorganges wird deutlicher, wenn wir den Ausdruck auf einen gemeinsamen Nenner bringen:

$$\beta = \frac{J_E - J_R - \Sigma V_A}{J_E - \Sigma V_A}$$

Im Zähler drückt  $J_E - J_R$  das Volumen der bis zur Erreichung des Gleichgewichtszustandes möglichen Gesamtverlandung ( $J_A$ ) aus

$$J_A = J_E - J_R$$

Von diesem wird die jeweilige Summe der Verlandung abgezogen. Der Ausdruck des Zählers gibt also das Volumen an, das jeweils noch für eine Verlandung zur Verfügung steht. Der Nenner stellt mit  $J_E - \Sigma V_A$  das jeweilige Volumen des Stauraumes dar. Die Gleichung besagt damit, daß die Klärwirkung ( $\beta$ ) durch das jeweilige Volumenverhältnis zwischen noch verlandbarem und vorhandenem Stauraum bestimmt wird. Wird  $\Sigma V_A = J_A$  und ist der verlandbare Raum somit aufgefüllt, so wird  $\beta = 0$ , und es ist keine Klärwirkung mehr vorhanden. Die zu- und abgeführten Schwebstoffe eines Jahres stimmen mengenmäßig überein, Anlandung und Abtrag gleichen sich aus, es herrscht "Gleichgewichtszustand".

Für die jeweils zu erwartende Anlandung ( $V_A$ ) läßt sich nach den vorstehenden Ausführungen folgende Beziehung aufstellen:

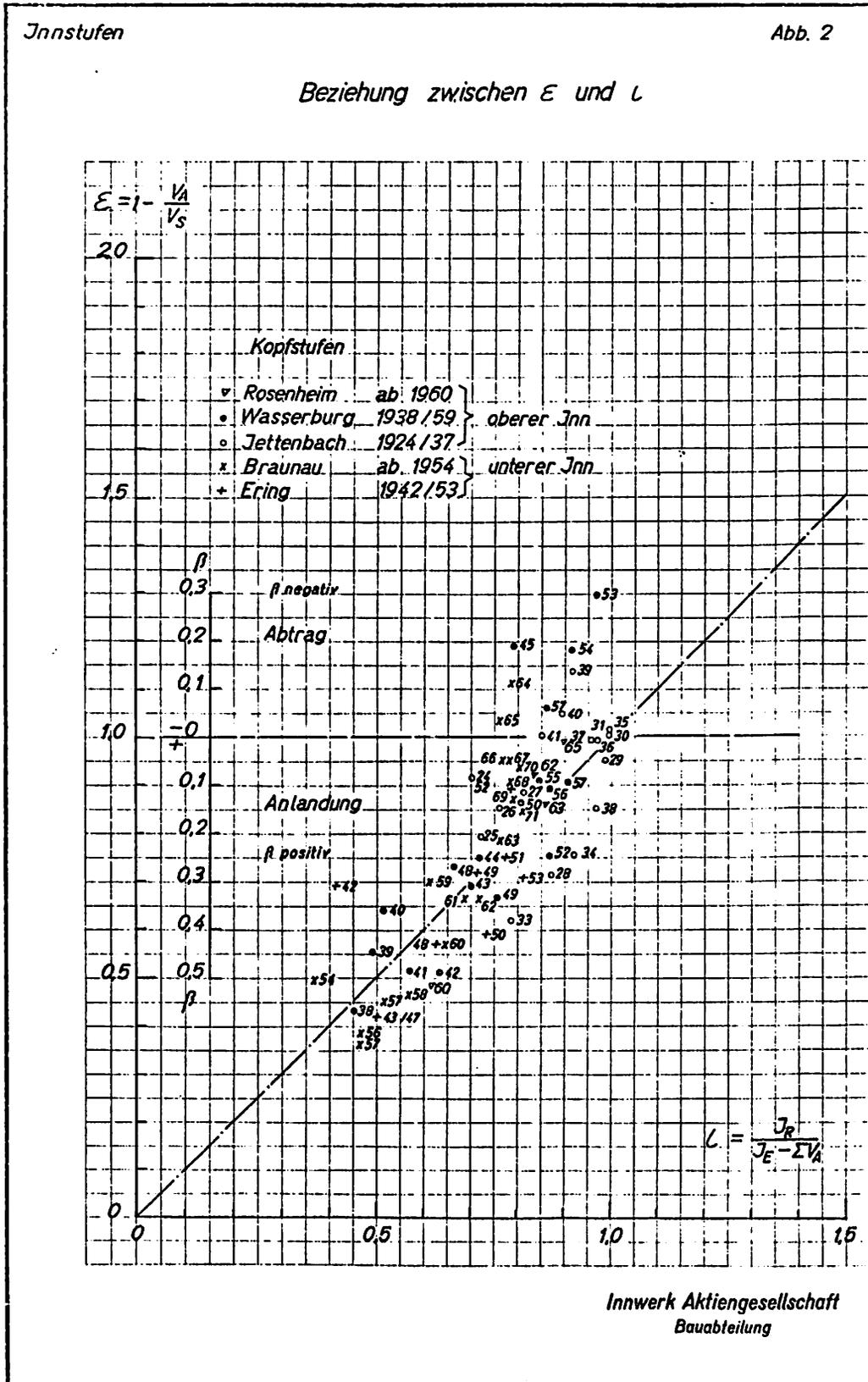


Abb. 2 Vergleichsdiagramm der  $\epsilon$ - und  $L$ -Werte

$$V_A = \beta \cdot V_S = (1 - \varepsilon) \cdot V_S$$

$$= \left(1 - \frac{J_R}{J_E - \sum V_A}\right) \cdot V_S$$

Es handelt sich hier um eine integrierbare Differentialgleichung der Form

$$y' = \left(1 - \frac{J_R}{J_E - y}\right) \cdot V_S$$

Das Integral dieser Gleichung lautet:

$$y + J_R \cdot \left[ \ln(J_E - J_R) - \ln(J_E - J_R - y) \right] = V_S \cdot x$$

$\sum V_A = y$  wird in Volumeneinheiten ( $m^3$ ),  $x$  in Zeiteinheiten (Jahren) und der Schwebstoffanfall  $V_S$  in Volumeneinheiten pro Zeiteinheit ( $m^3$  pro Jahr) ausgedrückt.

Das Integral ist nicht nach  $y$  auflösbar. Durch Einsetzen verschiedener  $y$ -Werte zwischen 0 und der größtmöglichen Anlandung  $J_A = J_E - J_R$  wird dann die Zeit  $x$  (Jahre) gefunden, in der die betreffende Anlandung eintritt. Bei einer schrittweisen Ermittlung der Anlandung einzelner Jahre wird der Staurauminhalt ( $J$ ) durch Abziehen des erhaltenen Wertes  $V_A$  jeweils neu berechnet und daraus für das nächste Jahr ein neuer  $y$ -Wert gebildet. Die schrittweise Berechnung hat den Vorteil, daß jährlich verschiedene Schwebstoffmengen ( $V_S$ ) und Nebeneinflüsse aus der Wasserführung und aus flußbaulichen Maßnahmen berücksichtigt werden können.

Am Beispiel der Stauhaltungen Wasserburg und Braunau sollen beide Arbeiten der Berechnung der tatsächlichen Summenlinie gegenübergestellt werden.

Der Berechnung für Wasserburg (Abb. 3) liegt ein  $J_E = 16,8 \text{ hm}^3$  und  $J_R = 7,5 \text{ hm}^3$  zugrunde, was eine Aufnahmefähigkeit bzw. einen Verlandungsraum  $J_A = 9,3 \text{ hm}^3$  ergibt. Für die Jahresschwebstofffracht ( $V_S$ ) wurden beim Integral als Mittelwert  $2,6 \text{ hm}^3/\text{Jahr}$ , bei der schrittweisen Berechnung die gemessenen Werte eingesetzt, die zusammen obigen Mittelwert ergeben. Die nach der Staubeckenspülung 1944/45 neu ansetzenden Summenlinien stimmen zunächst wieder gut mit dem tatsächlichen Verlauf überein. In den Jahren 1951/53 wurde der Abfluß bis nahe an MHQ zur Verringerung der Anlandungen zwischen Leitdämmen zusammengefaßt, was zu einer weitgehenden Ausschaltung der ausgedehnten Altwässer in den bis zu 500 m breiten Vorländern führte. Dementsprechend wurde bei der schrittweisen Berechnung in diesen 3 Jahren  $J_E$  und damit auch  $J = J_E - \sum V_A$  um jeweils  $0,3$  bzw. insgesamt  $0,9 \text{ hm}^3$  reduziert.

Für die Berechnung der Summenlinien des im Bereich der Salzachmündung gelegenen Stauraums Braunau (Abb. 4) wurde ein  $J_E = 39 \text{ hm}^3$ ,  $J_R = 15 \text{ hm}^3$  und  $J_A = 24 \text{ hm}^3$  eingesetzt. Die ersten 6 Jahre ab Einstau (1954/59) waren außergewöhnlich wasserreich und hatten demnach eine relativ hohe Schwebstofffracht ( $V_S$ ) von  $5,2 \text{ hm}^3$ . Das mit einem Wert  $V_S = 5,0$  berechnete Integral liegt so zunächst unter der tatsächlichen Summenlinie. Nach Erreichung der ersten Spitze bleibt die tatsächliche Verlandung unter den berechneten Linien, weil die Verlandungsräume der umfangreichen Vorländer mit zunehmender Annäherung an den Gleichgewichtszustand allmählich immer mehr ausgeschaltet wurden.

Bei Festlegung der Jahresschwebstofffracht ( $V_S$ ) ist darauf zu achten, daß Meßstellen mit geringer Turbulenz oft zu geringe Werte ergeben, weil die sich in Bodennähe bewegenden Feinstoffe nicht genügend erfaßt werden. Es ist dann u.U. notwendig, einen Aufwertungsfaktor einzusetzen, dessen Größe am zweckmäßigsten durch einen Vergleich mit der spezifischen Schwebstoffführung benachbarter Meßstellen gewonnen wird. So mußten beispielsweise die Ergebnisse der Meßstelle Braunau, die im Rückstau der Stufe Ering liegt, mit dem Faktor 1,36 multipliziert werden.

Der als Ausgangsgröße dienende Staurauminhalt bei Einstau ( $J_E$ ) setzt sich aus zwei Teilen zusammen und zwar dem Volumen unter der Linie des Stauhorizontes bis zum Schnittpunkt mit der Flußsohle, der die Länge des

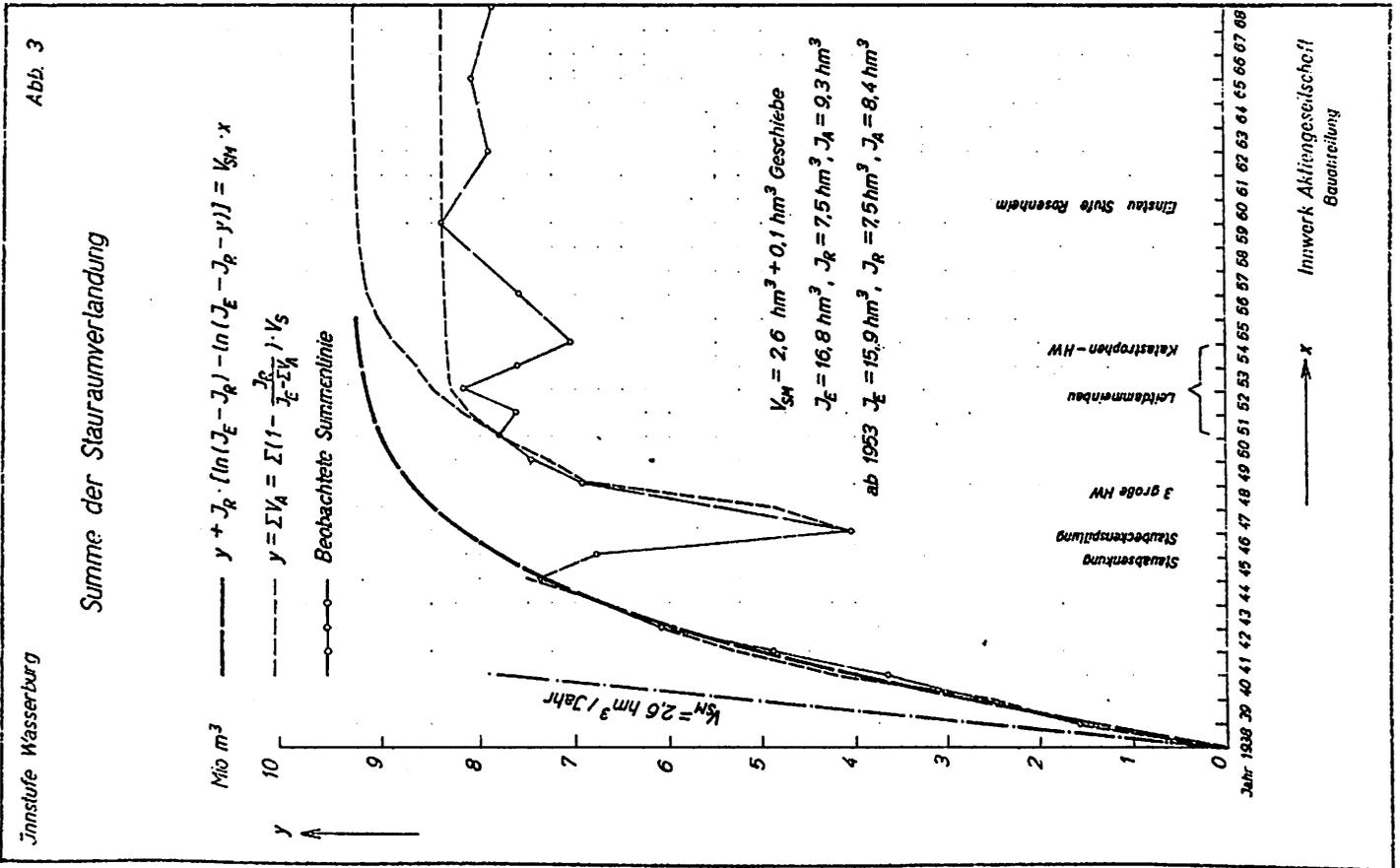


Abb. 3: Summe der Stauraumverlangung Wasserburg

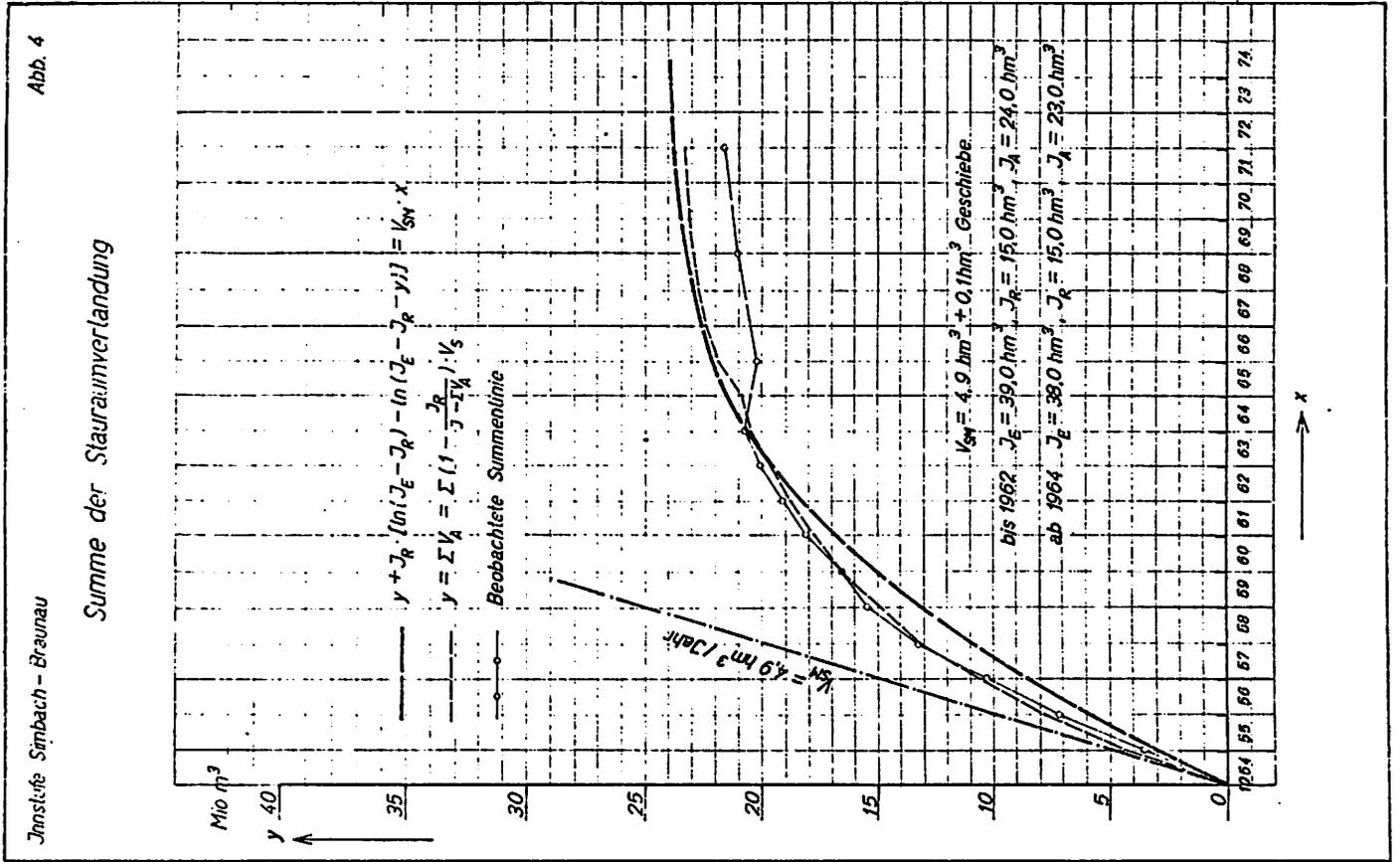


Abb. 4: Summe der Stauraumverlangung Braunau

hydrostatischen Staues ( $L_0$ ) bestimmt und aus dem Volumen über der Stauwaage, das von der Wasserführung und dem Grad der Verlandung abhängt. Den vorliegenden Untersuchungen wurde ein Abfluß ( $Q$ ) gleich der doppelten Mittelwasserführung ( $2MQ$ ) zugrundegelegt, bei dem im verlandeten Stauraum etwa die Grenze zwischen Anlandungen und Abtrag liegt. Da die Gleichgewichtsbedingung ( $J_E - \sum V_A = J_R$ ) vom Zustand nach erfolgter Verlandung ausgeht, muß als Volumen über Stauhohizont das des verlandeten Stauraumes eingesetzt werden. Es ergibt sich aus der unter Berücksichtigung der Verlandung aufgestellten Staukurvenberechnung. Es wäre auch möglich, genau vom Volumen des nicht verlandeten Stauraumes auszugehen; es dürfen dann aber die über der ursprünglichen Staukurve liegenden Anlandungen in  $\sum V_A$  nicht enthalten sein.

Die Berechnung des Reststauraumes ( $J_R$ ) erforderte Untersuchungen über den nach erfolgter Verlandung, d.h. im Gleichgewichtszustand verbleibenden Restquerschnitt ( $F_R$ ) im unteren Bereich des Stauraumes

$$F_R = B \cdot t_R$$

Im Bestreben, örtliche Einflüsse und nur in unmittelbarer Wehrnähe eintretende Sohlenveränderungen möglichst auszuschalten, wurde eine Mittelbildung über die untersten 3 km des Stauraumes vorgenommen.

Um Flußstrecken unterschiedlichen Abflusses ( $Q$ ) miteinander vergleichen zu können, wurden den Vergleichsuntersuchungen nicht  $Q$  und  $F_R$ , sondern die Abflußbelastung pro m Bettbreite ( $q$ ) und dementsprechend auch statt der Fläche  $F_R$  die mittlere Tiefe ( $t_R = F_R/B$ ) zugrundegelegt. Die so erhaltenen Werte ergaben eine Proportionalität zwischen  $q$  und  $t_R^{7/6}$ , was besagt, daß das Verhältnis  $q/t_R^{7/6}$  innerhalb der Kraftwerkskette für einen bestimmten Abfluß jeweils einen konstanten Wert  $a$  ergibt.

$$\frac{q}{t_R^{7/6}} = a$$

Für den Abfluß  $2Mq$  wurde ein Wert  $a = 0,75$ , für das mittlere Jahreshochwasser  $MHq$  ein Wert  $a = 1,35$  festgestellt.

Setzen wir in der Manning-Gauckler-Strickler'schen Abflußgleichung

$$v = k \cdot R^{2/3} \cdot i^{1/2}$$

für  $V = Q/F = q/t$  und näherungsweise  $R = t$ , so ergibt sich

$$\frac{q}{t^{7/6}} = a = k \cdot (t \cdot i)^{1/2}$$

Mit  $q/t^{7/6} = \text{const}$  wird also auch das Produkt  $k \cdot (t \cdot i)^{1/2} = \text{const}$ . Das bestätigt die der Sohlenberechnung zugrundegelegte Voraussetzung, daß der Gleichgewichtszustand der Sohle durch jeweils gleiche Grenzschleppspannungen

$$\tau = \gamma \cdot t \cdot i$$

bestimmt wird. Zutreffend ist ferner, daß die Grenzschleppspannung mit zunehmendem Abflußbeiwert ( $k$ ) kleiner und umgekehrt mit kleiner werdendem Abflußbeiwert größer wird.

In einem Vergleichsdiagramm (Abb. 5) wurden die ursprünglichen und die nach Verlandung vorhandenen Tiefen in Abhängigkeit von  $2Mq$  aufgetragen. Es zeigt, daß die Übereinstimmung mit der Bezugskurve - gemessen an den teilweise sehr beträchtlichen Veränderungen - durchaus befriedigend ist. Eine gesonderte Auftragung (Abb. 6) der im Gleichgewichtszustand eingetretenen Werte läßt gewissen Streuungen um die dem Wert  $a = 0,75$  entsprechende Mittellinie erkennen. Diese sind jedoch auch nicht willkürlich; denn die Punkte geringerer Tiefe sind die der "Kopfstufe" Rosenheim und der durch das Alzgeschiebe belasteten Stufe Stammham.

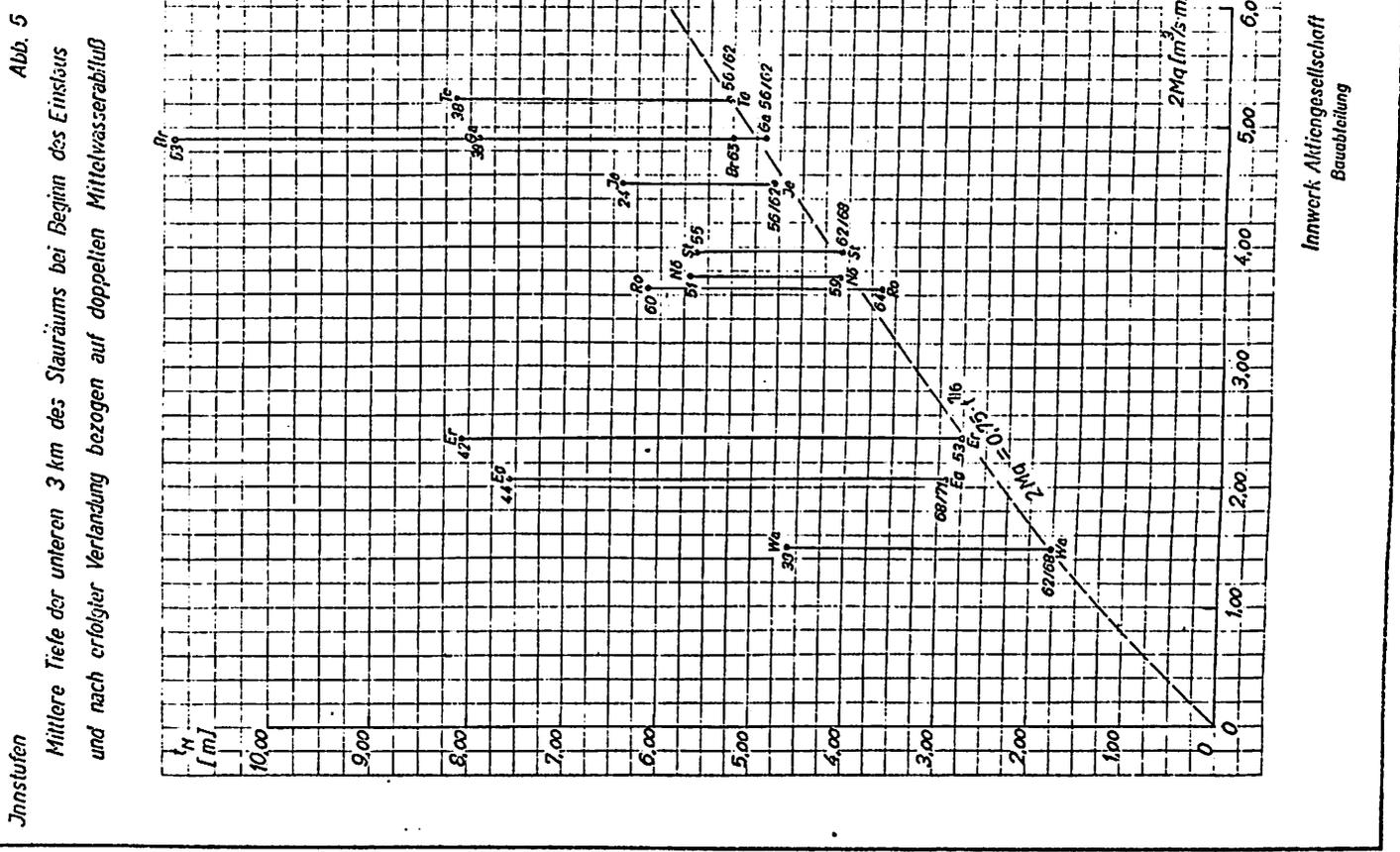


Abb. 5: Mittlere Tiefe der unteren 3 km des Stauraums beim Einsatz und nach erfolgter Verlandung

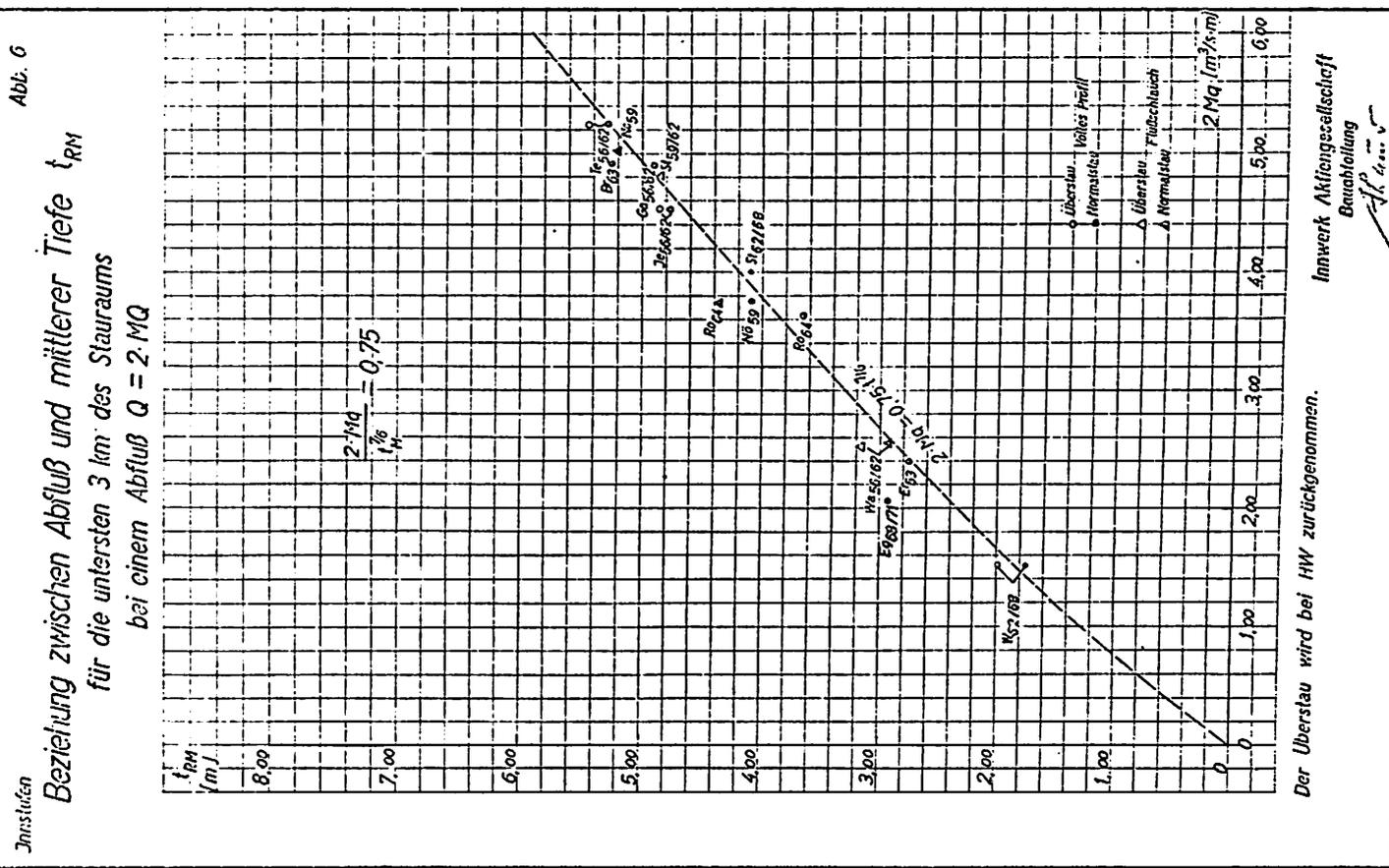
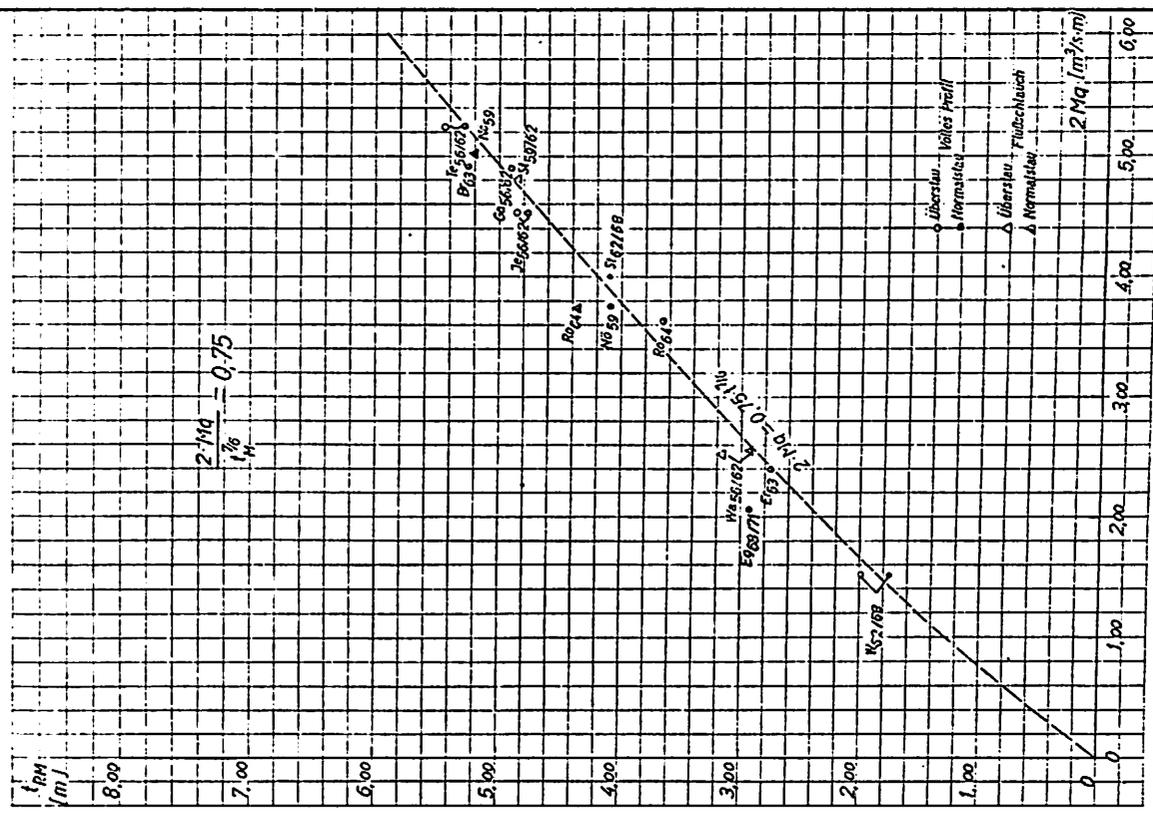


Abb. 6: Beziehung zwischen der Resttiefe der unteren 3 km des Stauraums und dem auf 1 m Bettbreite bezogenen Abfluß bei 2 MQ

Innstufen

Der Überstau wird bei HW zurückgenommen.



Innwerk Aktiengesellschaft  
Baubteilung  
A. K. ...  
22.10.79

Innstufen

Im Wert  $a$  ist noch die spezifische Schwebstoffführung enthalten. Nach den von Samarin an offenen Kanälen durchgeführten Messungen kann für die im Gleichgewichtszustand mögliche Grenzswebstoffdichte  $\rho_w$  ( $\text{Kg/m}^3$ ) folgende Abhängigkeit von der mittleren Fließgeschwindigkeit ( $v$ ) und der mittleren Sinkgeschwindigkeit ( $w$ ) angenommen werden

$$\rho_w = 0,022 \cdot \left(\frac{v}{w}\right)^{3/2} \cdot (R \cdot i)^{1/2}$$

setzen wir gemäß der Abflußgleichung nach Manning-Gauckler-Strickler

$$(R \cdot i)^{1/2} = \frac{v}{k \cdot R^{1/6}}$$

so ergibt sich die abgewandelte Form

$$\rho_w = \frac{0,022}{k \cdot R^{1/6}} \cdot \frac{v^{5/2}}{w^{3/2}}$$

Im verlandeten Stauraum entspricht  $\rho_w$  der spezifischen Schwebstoffführung, die die mittlere Fließgeschwindigkeit des Gleichgewichtszustandes und damit den Restquerschnitt bestimmt.

Nach einem überschlägigen Vergleich mit den Stauhaltungen am unteren Lech scheint der Einfluß der spezifischen Schwebstoffführung auf den im Gleichgewichtszustand verbleibenden Restquerschnitt jedoch geringer zu sein, als nach vorstehender Gleichung zunächst anzunehmen ist. Einer vierfach größeren Schwebstoffbelastung des Inn steht bei gleichwertigem Abfluß (2 MQ) eine nur etwa 25 % größere Fließgeschwindigkeit gegenüber. Der zugeordnete  $a$ -Wert dürfte am Lech etwa 0,60 betragen.

In dem verbleibenden Reststauraum  $J_R$  vollzieht sich der Übergang vom restlichen Abflußquerschnitt des unteren Stauraumes ( $F_R$ ) zum Querschnitt des natürlichen Flusses ( $F_N$ ) an der Stauwurzel. Neben einer genauen Ermittlung von  $J_R$  aus einer Staukurvenberechnung mit gleichzeitiger Berechnung der zu erwartenden Auflandung ist auch eine überschlägige Ermittlung des Reststauraumes aus den Grenzwerten  $F_R$  und  $F_N$  möglich. Gehen wir davon aus, daß der Anteil dieser beiden Größen am mittleren Restquerschnitt ( $F_{RM}$ ) durch das Maß des Aufstauens, d.h. durch das Verhältnis zwischen der Tiefe des natürlichen Flusses ( $t_N$ ) und der durch den Aufstau entstandenen Tiefe am Wehr ( $t_{St}$ ) bestimmt wird, wobei wir das Verhältnis dieser Tiefe mit

$$\vartheta = \frac{t_N}{t_{St}}$$

bezeichnen, so ergibt sich folgender Ansatz für den mittleren Restquerschnitt des Stauraumes

$$F_{RM} = \vartheta \cdot F_N + (1 - \vartheta) \cdot F_R$$

Bei Stauhaltungen unterschiedlicher Breite und auch bei Zusammenfassung des Flusses durch Leitwerke ist  $F_R$  mit dem Ansatz

$$\frac{Q}{B_M \cdot t^{7/6}} = a$$

aus der mittleren Breite ( $B_M$ ) des eigentlichen Flußbettes zu berechnen.

Der Stauraminhalt selbst ist

$$J_R = F_{RM} \cdot L_0$$

$L_0$  ist die Länge des hydrostatischen Staus; sie ist die am eindeutigsten definierte Vergleichsgröße. Bei Stauhaltung in Kraftwerksketten wird  $L_0$  häufig nicht erreicht. Der mittlere Restquerschnitt ( $F_{RM}$ ) wird dadurch relativ größer und der Einfluß von  $F_N$  auf  $F_{RM}$  geringer. Neben dem Flächenverhältnis bestimmt dann auch noch das Längenverhältnis

$$\lambda = \frac{L}{L_0}$$

den Anteil von  $F_N$ . Dementsprechend erhalten wir den ergänzten Ansatz

$$F_{RM} = \vartheta \cdot \lambda \cdot F_N + (1 - \vartheta \cdot \lambda) \cdot F_R$$

Für  $J_R$  ist nicht mehr  $L_0$  sondern die tatsächliche Länge  $L$  maßgebend.

$$J_R = F_{RM} \cdot L$$

Einen weiteren Ansatz für die Berechnung des Reststauraumes erhalten wir aus einer geometrischen Betrachtung. Wenn wir davon ausgehen, daß der Querschnitt des natürlichen Flusses ( $F_N$ ) über den gesamten Stauraum durchläuft und daß die durch den Aufstau bewirkte Querschnittsvergrößerung ( $F_R - F_N$ ) entsprechend einer kubischen Parabel vom Wehr zur Stauwurzel hin abnimmt, so ergibt sich

$$J_R = L_0 \cdot (0,25 \cdot F_N + 0,75 \cdot F_R)$$

Für die gekürzte, nicht bis zur Stauwurzel reichende Stauhaltung einer Kraftwerkskette lautet der erweiterte Ansatz

$$J_R = L \cdot \frac{1}{4} \cdot \lambda^3 \cdot F_N + (1 - \frac{1}{4} \cdot \lambda^3) \cdot F_R$$

wobei  $\lambda$  wieder das Verhältnis  $L/L_0$  angibt.

Wenn die Überlegungen für eine überschlägige Ermittlung des Staurauminhalts bei Einstau ( $J_E$ ), des Restquerschnitts ( $F_R$ ) und des Reststauraums ( $J_R$ ) weit vom eigentlichen Thema wegführten, so waren die diesbezüglichen Ausführungen doch notwendig, weil jede dieser Größen die Entwicklung der Stauraumverlandung maßgebend beeinflusst und genaue Werte häufig nicht vorliegen. Je mehr sich die Verlandung dem Gleichgewichtszustand nähert, desto mehr wirken sich Abweichungen des Abflußgeschehens, d.h. der durch MQ charakterisierten Jahreswasserführung vom langfristigen Mittelwert MMQ und des Jahreshochwassers HQ vom mittleren Jahreshochwasser MHQ aus. Der Wert für den Reststauraum  $J_R$  muß daher noch mit einem Faktor  $(MQ/MMQ \cdot HQ/MHQ)^n$  ergänzt werden.

Die Verlandungsgleichung erhält dann die Form

$$V_A = \left[ 1 - \frac{J_R}{J_E - \sum V_A} \cdot \left( \frac{MQ}{MMQ} \cdot \frac{HQ}{MHQ} \right)^n \right] \cdot V_S$$

Bei der Wahl des Exponenten  $n$  ist noch zu berücksichtigen, daß in Stauhaltungen mit ausgedehnten Vorländern, vor allem im Anfangsstadium der Verlandung, größere Hochwässer nicht eine räumende, sondern eine die Verlandung begünstigende Wirkung haben, indem sie zu einer Vergrößerung der überströmten Vorlandflächen führen, die durch ihre geringe Tiefe für das Absetzen von Schwebstoffen besonders gute Voraussetzungen bieten. Dieser gegensätzlichen Auswirkung entspricht ein Exponent

$$n = 1 - 0,5$$

Im Bereich  $\iota = 0$  bis  $\iota = 1$  bewegt sich der Exponent  $n$  somit zwischen  $-$  und  $+ 0,5$ . Da die Abhängigkeit des Gleichgewichtszustandes bzw. des Reststauraums ( $J_R$ ) vom Abfluß im Produkt  $MQ \cdot HQ$  ausgedrückt wird, entspricht  $n = 1/2$  im Gesamten einer linearen Abhängigkeit von  $Q$ . Der Ansatz für den aus dem Stauraum abgeführten Anteil  $\epsilon$  der Jahresschwebstofffracht ( $V_S$ ) lautet nun

$$\epsilon = \iota \cdot \left( \frac{MQ}{MMQ} \cdot \frac{HQ}{MHQ} \right)^{\iota - 0,5}$$

Die der schrittweisen Berechnung zugrunde zu legende Verlandungsgleichung erhält dementsprechend die Form

$$V_A = \left[ 1 - \iota \cdot \left( \frac{MQ}{MMQ} \cdot \frac{HQ}{MHQ} \right)^{\iota - 0,5} \right] \cdot V_S$$

wobei  $\iota = J_R / (J_E - \sum V_A)$ .

Sobald sich  $\epsilon$ -Werte  $> 1$  bzw. negative  $\beta$ -Werte ergeben, ist zu berücksichtigen, daß es sich nicht mehr um einen Absatz- bzw. Anlandungsvorgang, sondern um Abtrag handelt. Dieser ist nicht mehr abhängig von der Schwebstofffracht ( $V_S$ ) des betreffenden Jahres, sondern vom Mittelwert ( $V_{SM}$ ) auf den sich der Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Das Arbeits- bzw. Räumvermögen ist wie der im Wert  $\epsilon$  enthaltene Reststauraum ( $J_R$ ) abhängig vom Abflußgeschehen des betreffenden Jahres, ausgedrückt im Verhältnis  $MQ \cdot HQ / MMQ \cdot MHQ$ , so daß  $\epsilon$  auch für das Ausmaß des Räumungsvorganges als Kriterium beibehalten werden kann. Für  $\epsilon$ -Werte  $> 1$  ergibt sich demnach ein Räumungsvolumen

$$V_R = (\epsilon - 1) \cdot V_{SM}$$

Die nach der verfeinerten Methode berechneten Summenlinien lassen erkennen, daß der Einfluß höherer Wasserführungen und die z.T. damit verbundenen Räumvorgänge Größenmäßig etwa berücksichtigt sind.

Ein Vergleich zwischen berechneter und der tatsächlichen Summenlinie Wasserburg (Abb. 7) zeigt allerdings, daß der in den Jahren 1951/54 erfolgte Einbau von Leitdämmen noch zu wenig erfaßt ist. Mit dem 1960 erfolgten Einstau der Stufe Rosenheim wurde die Stauhaltung Wasserburg zum "Unterlieger". Es trat daher der mit dem Feststoffrückhalt der Stauhaltung Rosenheim verbundene, früher schon bei den Stauhaltungen Jettenbach und Ering beobachtete vorübergehende Abbau der Anlandungen ein.

Bei der Summenlinie Braunau (Abb. 8) ist der geringe Rückgang der Anlandungen im Hochwasserjahr 1965 auch im Ergebnis der Berechnung angedeutet. Da der Stauraum mit einem  $\iota$ -Wert von etwa 0,75 noch um etliches vom Gleichgewichtszustand entfernt war, konnte auch ein relativ großer Hochwasserfaktor nur einen  $\epsilon$ -Wert wenig größer als 1 bewirken.

Die vorliegenden Gleichungen wurden aus den Umbildungsvorgängen in sogenannten Kopfstufen abgeleitet, auf die - abgesehen vom zurückgehaltenen Geschiebe - die gesamte Feststofffracht des Flusses zukommt.

Komplizierter ist der Verlandungsvorgang der Unterlieger. Ihre Stauräume bilden im Anfangstadium der Verlandung eine Einheit mit dem Stauraum des Oberliegers, da ihnen zunächst auch bei höheren Wasserführungen nur relativ feines Material zufließt. Mit zunehmender Verlandung der Oberlieger gelangen vor allem bei größeren Hochwässern auch gröbere, d.h. anlandungsfreudigere Schwebstoffe in die unterhalb gelegenen Stauräume. Dies führt dazu, daß sich der Verlandungsvorgang und damit auch der Gleichgewichtszustand der Unterlieger allmählich dem einer Kopfstufe nähert.

Eine Auftragung der  $\epsilon$ -Werte für die unterhalb der Stufe Wasserburg im engen Durchbruchtal des Inn gelegene Stauhaltungen Teufelsbruck und Gars in Abhängigkeit von  $\iota$  (Abb. 9) läßt erkennen, daß im Gegensatz zu der bei Kopfstufen gegebenen linearen Abhängigkeit ( $\epsilon_0 = \iota_0$ ) eine Beziehung

$$\epsilon_U = \iota_U^n$$

gegeben ist. Hierbei ist  $\epsilon_U$  wie  $\epsilon_0$  als Anteil an der gesamten Fracht am oberen Ende der Kraftwerkskette anzusehen. Die Anlandung des Unterliegers ( $\beta_U$ ) ergibt sich aus der Beziehung

$$\beta_U = \epsilon_0 - \epsilon_U = \iota_0 - \iota_U^n$$

Die Größe des Exponenten ( $n$ ) wie auch der Anteil, mit dem die Verlandung bei Einstau des Unterliegers

Summe der Stauraumverlandung

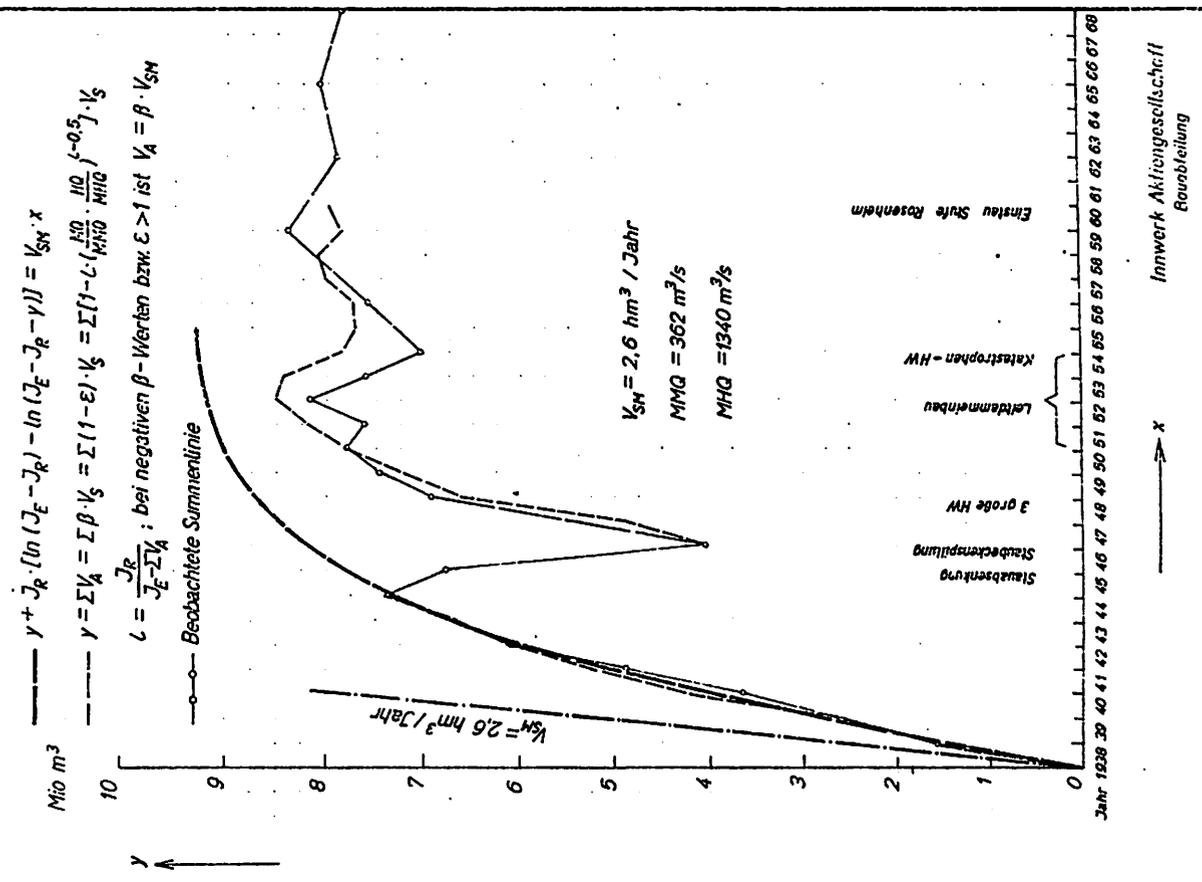


Abb. 7: Mit Berücksichtigung des Hochwassereinflusses berechneten Stauraumverlandung Wasserburg

Summe der Stauraumverlandung

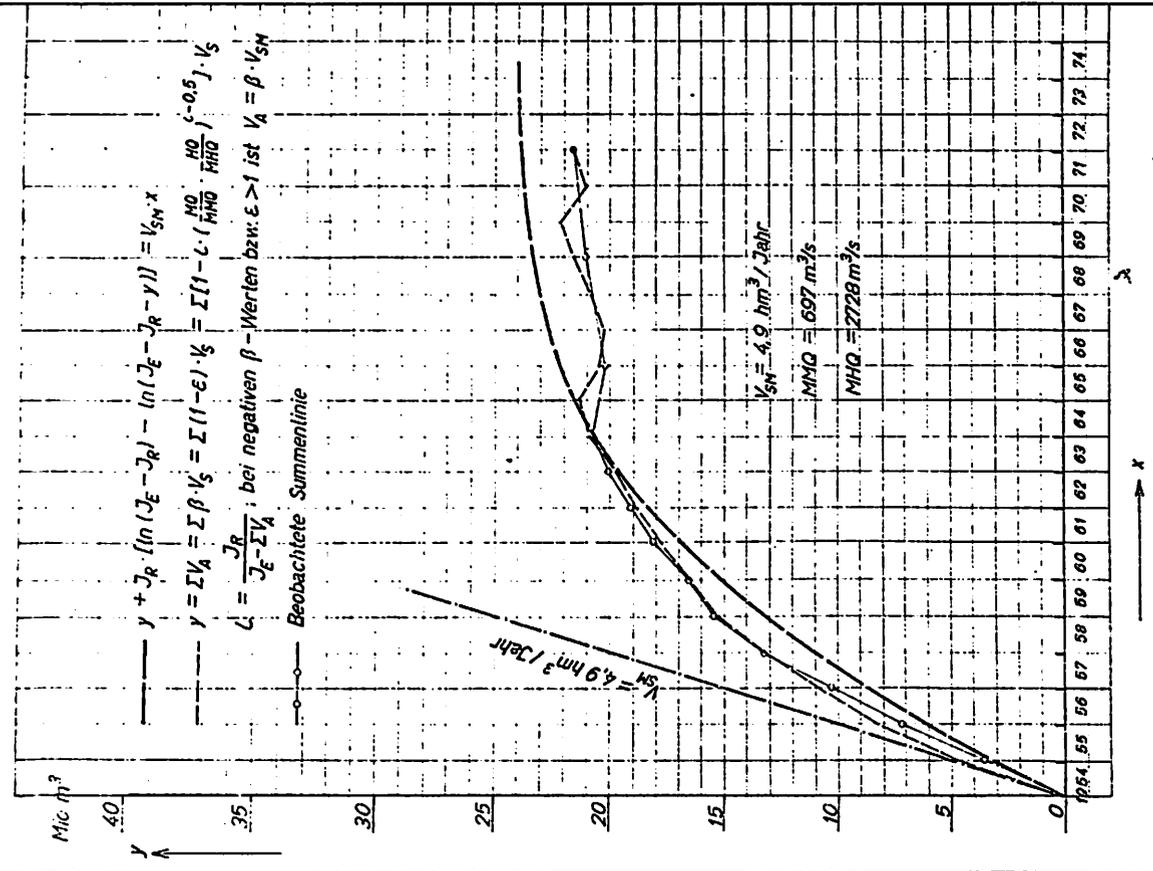
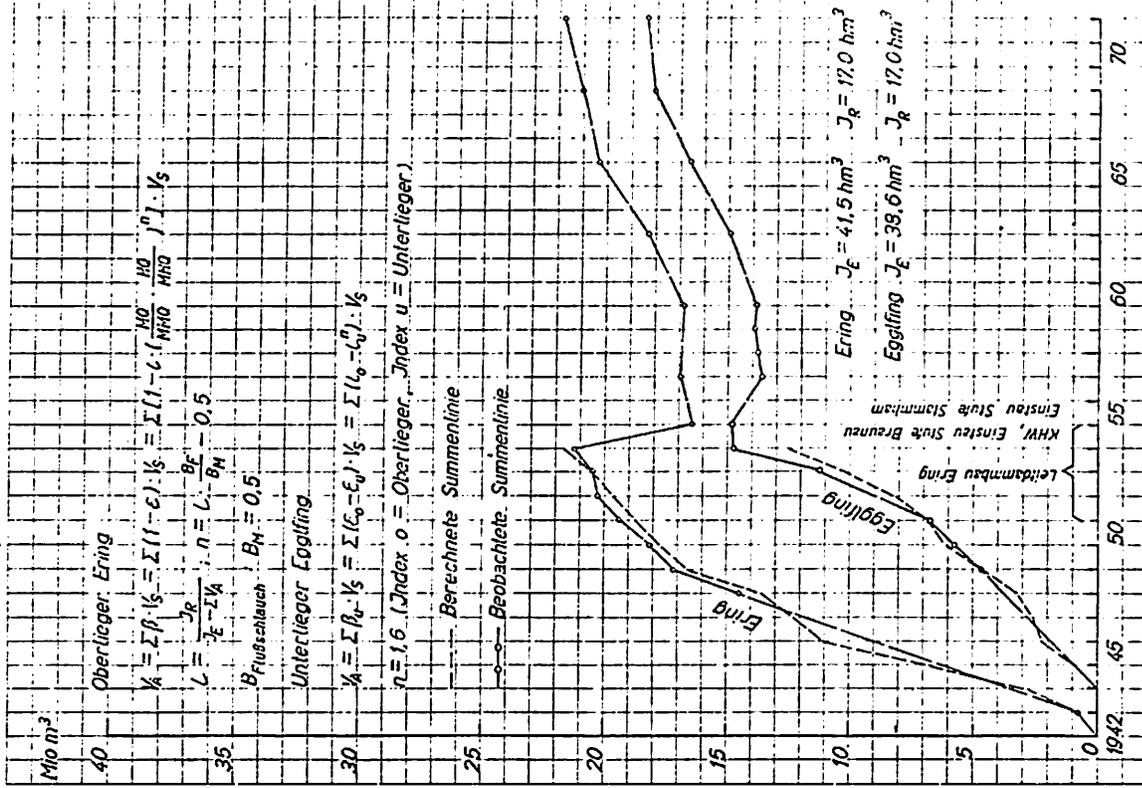


Abb. 8: Mit Berücksichtigung des Hochwassereinflusses berechnete Stauraumverlandung Braunau

Abb. 10

Innere Ering und Eggling  
Summen der Stauraumverlandung

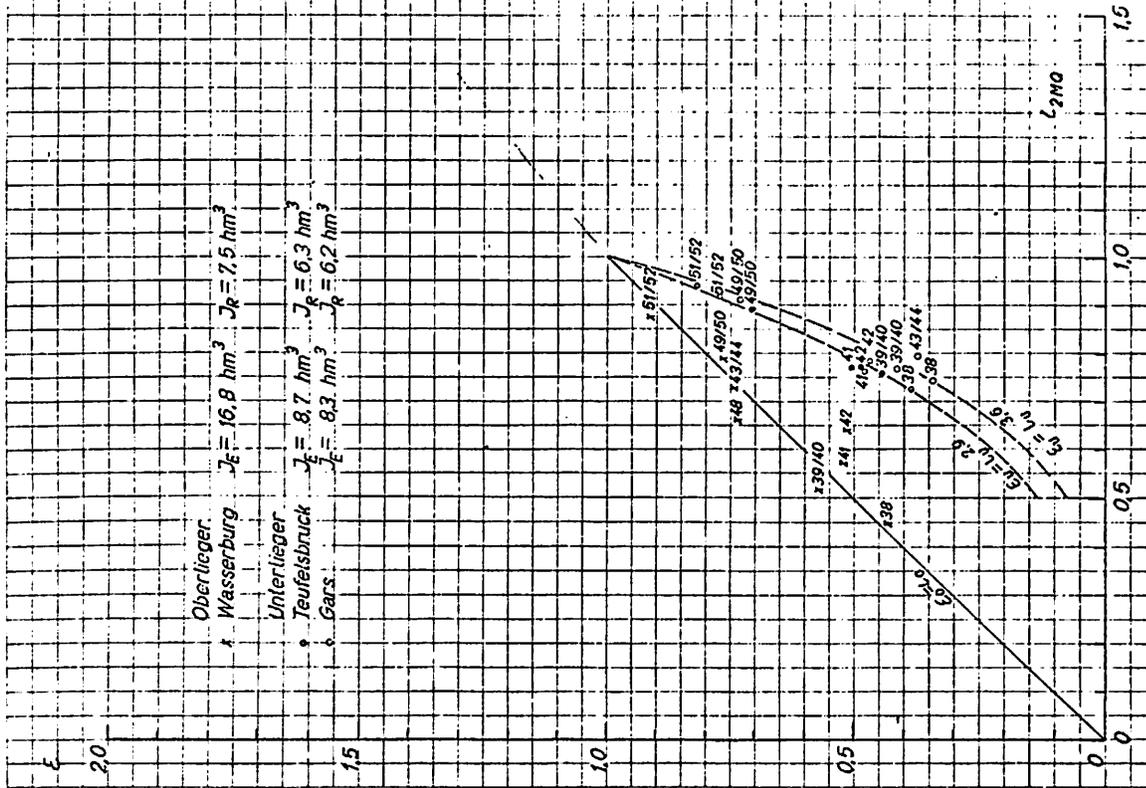


Innwerk Aktiengesellschaft  
Baubteilung

Abb. 10: Berechnete Summenlinie der Stauraumverlandung Ering und Eggling

Abb. 9

Oberstufen  
Beziehung zwischen  $\epsilon_0$  und  $\epsilon_u$  bzw  $\epsilon_u$  und  $\epsilon_0$



Innwerk Aktiengesellschaft  
Baubteilung

Abb. 9: Vergleichsdiagramme der - und -Werte für Oberlieger Wasserburg und Unterlieger Teufelsbruck und Gars

( $\beta_{uE}$ ) einsetzt, hängt vom gegenseitigen Größenverhältnis der Stauräume ab, das durch den Wert  $J_R/J_E$  des Unterliegers bei Einstau ( $l_{uE}$ ) und den Wert  $J_R/J_X$  des Oberliegers ( $l_{oX}$ ) zu diesem Zeitpunkt (x) charakterisiert ist.

Am oberen Inn mit der Kopfstufe Wasserburg und den gleichzeitig eingestauten Unterliegern Teufelsbruck und Gars entspricht einem  $l_{oE} : l_{uE} = 0,45 : 0,73 = 0,62$  ein  $\beta_{uE}$  von etwa 0,06. Am unteren Inn mit der Kopfstufe Ering und dem zwei Jahre später eingestauten Unterlieger Egglfing betrug bei etwa gleichen  $l$ -Werten (0,44)  $\beta_u$  im Mittel der ersten 5 Jahre etwa 0,19;  $\beta_{uE}$  selbst darf auf 0,16 geschätzt werden.

Aus der Beziehung

$$\beta_{uE} = \epsilon_0 - l_{uE}^n$$

ergibt sich

$$n = \frac{\ln(\epsilon_0 - \beta_{uE})}{\ln l_{uE}}$$

Der so ermittelte Exponent beträgt für Teufelsbruck etwa  $n = 3$ , für die unterhalb folgende Stufe Gars etwa  $n = 3,6$  und für Egglfing etwa  $n = 1,5$ .

Die Anlandung  $V_{Au}$  ergibt sich aus der Gesamtschwebstofffracht ( $V_S$ ) am Beginn der Kraftwerkskette zu:

$$V_{Au} = V_S \cdot (\epsilon_0 - l_u^n)$$

Für weiter flußabwärts folgende Stauhaltungen ist der erste Unterlieger wieder Oberlieger und so fort.

Obige Formel ergibt einen S-förmigen Verlauf der Anlandungskurve und führt beim "Unterlieger" Egglfing zu einer guten Obereinstimmung (Abb. 10). Der ungewöhnlich starke Anstieg der Summenlinie Egglfing im Jahre 1953 ist mit dem Leitdammbau der oberhalb gelegenen Stufe Ering begründet, der in der Berechnung nicht erfaßt ist. Bei den durch Staubeckenspülungen (Wasserburg 1945/46 und Teufelsbruck 1947) in der natürlichen Entwicklung gestörten Unterliegern Teufelsbruck und Gars ist der wirkliche Anstieg der Summenlinie im mittleren Bereich nur etwa die Hälfte der berechneten Werte.

Das unterschiedliche Verhalten dürfte in der unterschiedlichen Größe der Verhältniszahl  $l_{oE} : l_{uE}$  (0,62 gegenüber etwa 1,0) liegen.

Bei Kopfstufen, die zum Unterlieger werden, tritt zunächst ein Abtrag ein, weil die zuvor im Anschluß an die Räumung der Hochwasserperiode erfolgte Wiederanlandung wegen des Schwebstoffrückhalts des Oberliegers nur mehr in geringerem Maße stattfinden kann. Erst nach mehreren Jahren der Einpendelung verhält sich auch die ursprüngliche Kopfstufe als echter Unterlieger.

Diese Vorgänge erfordern es, die Untersuchungen auf den Jahresablauf selbst auszudehnen, wobei die Abflußdauerlinie des betreffenden Jahres als Kriterium dienen kann.

Abschließend muß nochmals darauf hingewiesen werden, daß die aufgezeigten Zusammenhänge lediglich als das Ergebnis der Verlandungsvorgänge im Inn angesehen werden dürfen. Da es sich bei den Feststoffen durchweg um Korngemische handelt, sind bei einer Übertragung auf andere Flußsysteme noch zusätzliche Untersuchungen notwendig. Es wäre wertvoll, wenn durch solche Arbeiten noch eine Vertiefung der Erkenntnisse über das äußerste komplexe Problem der Stauraumverlandung erreicht werden könnte.

Erklärung der verwendeten Zeichen

Zeichen	Bedeutung	Einheit
B	Breite des Abflußquerschnitts	m
$F_N$	Abflußquerschnitt des natürlichen (ungestauten) Flusses	$m^2$
$F_R$	Restquerschnitt des verlandeten unteren Stauraums	$m^2$
$F_{RM}$	mittlerer Restquerschnitt des Stauraumes	$m^2$
i	Fließgefälle	-
J	jeweiliger Staurauminhalt	$m^3$
$J_A$	vom Stauraum aufnehmbares Verlandungsvolumen	$m^3$
$J_E$	Stauraum-Inhalt bei Einstau	$m^3$
$J_R$	im Gleichgewichtszustand verbleibender restlicher Stauraum-Inhalt (Reststauraum)	$m^3$
k	Geschwindigkeitsbeiwert	$m^{1/3}/s$
L	Länge der Stauhaltung, soweit kleiner als $L_0$	m
$L_0$	Länge des hydrostatischen Staues	m
Q	Abfluß	$m^3/s$
HQ	größtes Hochwasser eines Jahres	$m^3/s$
MHQ	mittleres Jahreshochwasser	$m^3/s$
MQ	Jahresmittel des Abflusses	$m^3/s$
MMQ	langfristiger Mittelwert des Abflusses	$m^3/s$
q	Abfluß pro m Bettbreite	$m^3/s \cdot m$
R	Profilradius	m
t	mittlere Tiefe des Abflußquerschnitts	m
$t_N$	mittlere Tiefe des natürlichen (ungestauten) Flusses	m
$t_R$	im Gleichgewichtszustand verbleibende mittlere Tiefe (Resttiefe) des unteren Stauraums	m
$t_{St}$	mittlere Tiefe des aufgestauten Flusses am Wehr	m
$V_A$	Volumen der jährlichen Anlandung	$m^3$
$V_{Au}$	Volumen der jährlichen Anlandung des Unterliegers	$m^3$
$V_R$	Volumen der Räumung eines Hochwasserjahres	$m^3$
$V_S$	Volumen der jährlichen Schwebstofffracht	$m^3$
$V_{SM}$	langfristiger Mittelwert der jährlichen Schwebstofffracht	$m^3$
v	Fließgeschwindigkeit	m/s
w	mittlere Sinkgeschwindigkeit	m/s
$\rho_w$	Grenzswebstoffdichte	$kg/m^3$
$\tau_0$	Grenzscheppspannung	$kp/m^2$

Dimensionslose Verhältniszahlen

$\beta$	Anteil der zurückgehaltenen Schwebstoffe (Klärwirkung)
$\epsilon$	Anteil der in das Unterwasser abgeführten Schwebstoffe
$\vartheta$	Verhältnis zwischen mittlerer Tiefe des natürlichen (ungestauten) Flusses und des aufgestauten Flusses am Wehr
$\zeta$	Verhältnis zwischen verbleibendem Reststauraum und vorhandenem Stauraum
$\lambda$	Verhältnis zwischen Länge des Stauraumes und Länge des hydrostatischen Staues
$\beta_u$	$\beta$ -Wert des Unterliegers
$\epsilon_u$	$\epsilon$ -Wert des Unterliegers
$\zeta_u$	$\zeta$ -Wert des Unterliegers
$\beta_{uE}$	$\beta$ -Wert des Unterliegers bei Einstau
$\epsilon_{uE}$	$\epsilon$ -Wert des Unterliegers bei Einstau
$\zeta_{ox}$	$\zeta$ -Wert des Oberliegers im Jahre x bei Einstau des Unterliegers

ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РУСЛОВОЙ СЕТИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ  
СТОКА ВОДЫ В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ ДУНАЯ

Михайлов В.Н. и Рогов М.М.

DIE ZU ERWARTENDEN ÄNDERUNGEN DES GEWÄSSERNETZES  
UND DER WASSERFRACHT IM DONAUMÜNDUNGSGEBIET

Michajlov V.N. und Rogov M.M.

Резюме

Ожидаемые изменения русловой сети устьевой области Дуная установлены путем анализа истории формирования, современного состояния и тенденции развития сети дельтовых водотоков. Выявлены закономерности сопутствующего перераспределения стока воды по рукавам дельты. Установлена тесная связь между перераспределением стока воды по рукавам дельты Дуная и изменением морфометрических характеристик водотоков. Обнаружена общая тенденция сокращения количества рукавов, упрощения структуры русловой сети и сосредоточения стока воды в ограниченном количестве рукавов по мере развития сети и выдвижения дельты в море. Выявлены активные и отмирающие рукава.

Zusammenfassung

Die Geschichte der Entwicklung des Donaudeltas wurde untersucht und dabei wurden gesetzmäßige Tendenzen der Veränderungen der Beaufschlagung der Haupt- und Nebenarme erarbeitet. Dabei wurden hydraulisch-morphometrische Methoden verwendet und mögliche anthropogene Einflüsse im gesamten Donaueinzugsgebiet und seinem Mündungsdelta berücksichtigt.

Bei den Untersuchungen stellte sich heraus, daß eine enge Beziehung zwischen der Neuverteilung der Wasserfrachten der einzelnen Donauarme und den morphometrischen Veränderungen der Wasserläufe besteht. Dabei wurde festgestellt:

1. Die Zahl der Deltaarme verringert sich laufend. Die Struktur des Gewässernetzes vereinfacht sich dadurch.
2. Abflüsse und Wasserfrachten konzentrieren sich auf die verbleibende geringe Anzahl von Deltaarmen.
3. Das Delta schiebt sich in das Meer vor.
4. Der Alterungsprozeß zeigt sich an den absterbenden Armen.

Устьевая область Дуная имеет большое хозяйственное значение и используется для сельского и рыбного хозяйства, судоходства, водоснабжения, туризма и т.д. Возможности использования устья Дуная в значительной степени определяются гидрологическими и морфологическими условиями, среди которых важное место занимают динамика гидрографической сети и распределение стока по рукавам. По этой причине оценка возможного изменения гидрографических условий в устье Дуная представляет большой интерес.

Приближенный прогноз ожидаемых изменений русловой сети дельты и распределения стока воды по рукавам может быть сделан с учетом истории формирования, современного состояния и тенденции развития гидрографической сети дельты с привлечением гидравлично-морфометрических методов расчета.

В начале развития дельты в ее современных границах, примерно 4 000 лет назад, Дунай впадал в обширный залив Черного моря, в значительной мере заблокированный морской косой, протянувшейся с севера на юг поперек выхода из залива в море (1). Под блокирующим влиянием косы в течение длительного времени шло формирование дельты выполнения залива вдоль северо-восточного склона Северной Добруджи - конуса выноса Георгиевского рукава (рис.1).

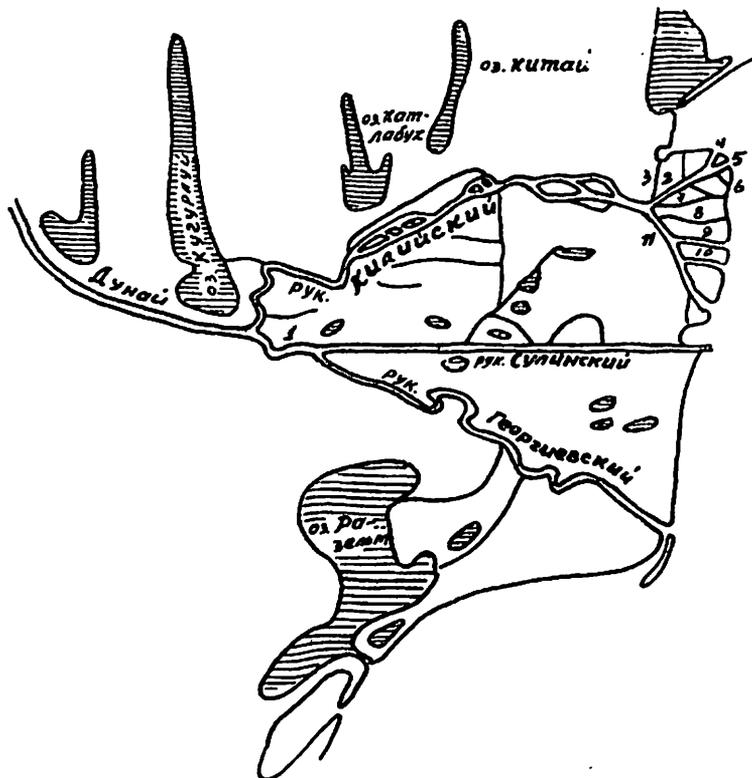


Рис. I. Устьевая область Дуная

Рукава : I - Тульчинский, 2 - Очаковский, 3-Белгородский, 4 - Прорва, 5 - Потаповский, 6 - Гнеушев, 7 - Анкудинов, 8 - Средний, 9 - Быстрый, 10 - Восточный, 11 - Старо-Стамбульский.

После смыкания конуса выноса с южной оконечностью морской косы (Караорман) большая часть Дунайского залива, расположенная к северу от Георгиевского рукава, превратилась в обширное материковое озеро.

Избыточный приток дунайских вод и повышение уровня воды в озере явились причиной прорыва морской косы южнее современной гряды Летя, что стимулировало ускоренное общее развитие и устьевое удлинение нового Сулинского рукава. Георгиевский рукав в период активного развития Сулинского рукава начал отмирать. Последний рукав, достигнув максимальной длины в I в. до н.э., также начал отмирать, а Георгиевский начал активизироваться. Только в конце XIX и в начале XX в. после проведения комплекса русловыправительных гидротехнических мероприятий Сулинский рукав вновь вступил в стадию активного развития, а Георгиевский рукав, соответственно, стал отмирать.

Ко времени формирования Сулинского рукава к северу от него в границах современной дельты продолжало существовать еще достаточно обширное придельтовое озеро, возможно лишь позже расчленившееся на два обособленных плеса: Пардино-Килийский (верхний), питавшийся в местным стоком, и Шонтя-Мерхейский (нижний), питавшийся в основном водами Дуная через мелкие боковые протоки рукава Шонтя. Видимо, в процессе развития русловой излучины рукава Шонтя в XIII - XIV вв. н.э. была прорвана гряда Стипок в ее западной оконечности

(Пардинский прорыв) и воды Дуная начали поступать в верхний плес придельтового озера, что привело к образованию Килийского прорыва через перешеек Килийской гряды у ее сочленения с Бужакским плоскогорьем и выходу вод Дуная через прорыв в нижний плес.

По тем же причинам и практически одновременно должен был произойти и прорыв морской косы, отделявшей нижний плес от моря (Вилковский прорыв). Таким образом, началось формирование нового направления стока дунайских вод и сложной русловой системы самого крупного в дельте Дуная Килийского рукава. Образование нового очень активного направления стока вызвало значительное уменьшение стока по ранее сформировавшимся Георгиевскому и Сулинскому рукавам и прекращение стадии их активного, прогрессирующего развития на долгое время.

В ходе последовательного выполнения наносами депрессий верхнего и нижнего озерных плесов шло формирование внутренних дельт Килийского рукава с довольно сложной и очень динамичной гидрографической сетью, на структуру которой решающее влияние оказывали Килийский и Вилковский прорывы, как направляющие выходные каналы стока. Образование нижней внутренней дельты могло начаться только после выхода в середине XVI в. одного из русловых водотоков верхней внутренней дельты непосредственно к Килийскому прорыву.

Вследствие мелководности плесов в обоих случаях формировались многорукавные дельты выполнения со множеством мелких водотоков, между которыми оставались не полностью заиленными небольшие озеровидные водоемы. В ходе последовательного заиления депрессий русловые водотоки постепенно продвигались от верхнего входного прорыва к нижнему выходному. При этом преимущественное развитие получали русловые водотоки, ближе всего совпадавшие с осью депрессий между входным и выходным прорывами. Они постепенно сосредоточивали в себе весь сток Килийского направления, водотоки же, проходившие в стороне от этой оси, со временем отмирали.

Характерно, что обе депрессии (оба плеса) так и остались далеко не полностью выполненными речными наносами в ходе формирования внутренних дельт. Бывшие заливы верхнего плеса Катлабух и Китай обособились в придельтовые озера. Кроме того остались еще невыполненными и другие более мелкие межрусловые понижения.

В нижней депрессии, не имевшей глубоко вдававшихся в материк заливов, остались слабо заиленными мелководные центральная и южная части. В нынешних условиях естественный процесс заиления депрессий в большой степени замедлен или вовсе прерван искусственным обвалованием русловых водотоков, особенно по левобережью.

После выхода водотоков непосредственно к Вилковскому прорыву в середине XVIII в. (I) началось формирование внешней, или морской дельты Килийского рукава. Условия ее формирования существенно отличаются от условий формирования внутренних дельт влиянием новых, в значительной мере определяющих характер развития дельты и ее гидрографической сети, морских факторов (волнение, вдольбереговой поток наносов, течения, глубина взморья и соленость морских вод).

Основным видом образования новых водотоков явилось устьевое баровое деление русла. Дополнительными были два вида образования водотоков прорывного характера: 1) поперечные прорывы устьевых кос основных водотоков и 2) прорывы берегов русла. Водотоки основного вида образования оказывались более жизнеспособными. Однако и в этом случае обычно более устойчивое развитие получал лишь один из вновь образовавшихся смежных водотоков. Это и обуславливало почти постоянное, ограниченное число магистральных рукавов и их преемственность в ходе всего развития морской Килийской дельты. Эти рукава образуют довольно устойчивую радиальную систему русловой сети дельты (рис.1).

Крупные магистральные рукава образуют собственную систему боковых водотоков преимущественно прорывного происхождения. Очень характерно, что возникновение новых водотоков за тот или иной период времени происходит главным образом в пределах участка устьевого удлинения основных русловых потоков за тот же период. Это предопределяет четко выраженную закономерность - последовательное смещение сети действующих боковых водотоков вниз по течению вдоль магистральных рукавов. Количество действующих водотоков не остается постоянным, но и не возрастает прогрессивно по мере роста площади дельты. В годы большой водности количество вновь образовавшихся водотоков превышает количество отмерших за тот же период. В маловодные периоды соотношение тех и других водотоков становится обратным.

Устойчивая радиальная система магистральных рукавов обеспечивает сравнительно равномерное распределение стока воды и наносов по периметру морского края дельты. Характер выдвижения и общей конфигурации морской дельты в основном определяются исходным к началу формирования дельты положением изобат устьевого взморья. Рукава, выдвигающиеся вдоль изобат, удлиняются быстрее рукавов, выдвигающихся по нормали к изобатам. Этим в основном и определяется "приплюснутость" формы Килийской морской дельты (рис.1).

Участок взморья между устьями белгородского рукава и Прорвы оказался ловушкой как для генерального северного, так и местного восточного вдольбереговых потоков наносов. Это обстоятельство в основном и предопределило нежизнеспособность левых боковых водотоков системы Очаковского рукава. По мере выхода морского края дельты на большие глубины скорость устьевого удлинения водотоков резко убывает или вовсе прекращается, а то и становится отрицательной, несмотря на неубывающий объем притока речных наносов, что определяется возрастающим влиянием глубины, морского волнения и наносотранспортирующей способности вдольберегового потока.

Современная тенденция развития русловой сети дельты Дуная сводится к следующему. Состояние и характер развития русла Дуная непосредственно выше вершины дельты оказывает и будет оказывать в последующем существенное влияние на развитие главного узла деления в вершине дельты. Четко выраженное сползание вниз по течению местного расширения русла и вершины излучины, находящейся в 2 км выше узла деления, в совокупности с жестким искусственным укреплением приверха водораздельного острова в вершине дельты (мыс Измаильский Чатал) может стать причиной естественной активизации Тульчинского рукава в ущерб Килийскому. Активизация Тульчинского рукава на современной стадии развития дельты определяется также более короткой его длиной (вместе с Сулинским рукавом) по сравнению с Килийским.

В системе Тульчинского рукава наблюдается довольно устойчивое более активное развитие Сулинского рукава с начала искусственного выправления его русла и определяемое именно этим фактом заметное отмирание Георгиевского рукава.

В системе Килийского рукава наблюдается четко выраженный общий процесс сосредоточения стока по наиболее крупным магистральным рукавам и отмирание сети боковых водотоков. Так, в системе верхней внутренней дельты в стадии наиболее выраженного отмирания находится рукав Кислицкий со Степовым. Несколько менее выражен процесс отмирания рукавов Татару и Даллера. Наиболее перспективными и активно развивающимися в данный момент являются рукава Средний и Килийский ниже слияния рукавов Среднего и Иванешти.

В системе русловых водотоков нижней внутренней дельты характер взаимовлияния отдельных водотоков более сложный. Особенно сложны гидравлично-морфологические условия в узле деления Килийского рукава на рукава Бабина и продолжение Килийского рукава, где на данный момент эти условия более благоприятны для входного створа в рукав Бабина. Однако в целом морфологические условия русла рукава Бабина препятствуют перераспределению стока в пользу этого рукава. Из всей системы водотоков наиболее перспективными с четко выраженными

морфологическими признаками активизации развития русла являются рукава Килийский и далее Прямой. Сравнительно стабильно состояние Соломонова рукава. Четко выражена тенденция отмирания Черновки и менее четко - рукава Бабина.

В системе водотоков морской Килийской дельты как самой молодой из всех русловых систем дельты Дуная четко выражен процесс сосредоточения стока по сравнительно ограниченному числу магистральных рукавов и активное отмирание мелких боковых водотоков. В подсистеме Очаковского рукава, в целом отмирающей, водотоки Потаповский и Гнеушев имеют некоторую тенденцию активизации главным образом за счет более выраженной, чем у подсистемы в целом, тенденции отмирания Полуночного, Белгородского, затем Анкудинова и Полуденного рукавов. Рукав Прорва также находится в стадии естественного отмирания, и лишь искусственные мероприятия сдерживают этот процесс.

В подсистеме Старостамбульского магистрального рукава в стадии хорошо выраженного отмирания находятся русловые водотоки Средний, Лимба (Масура), Лебединка. Менее четко прослеживается тенденция к отмиранию у небольших рукавов Цыганского и Заводнинского. В стадии относительной стабильности находится рукав Восточный.

Рукав Быстрый является примером проявления вторичной активности. Проявление такой активности способствует, с одной стороны, его меньшая длина по сравнению с длиной Старостамбульского рукава ниже отделения Быстрого, с другой стороны, выход устья Быстрого на участок взморья с высокой динамической активностью морского волнения и вдольберегового потока. Фактором, благоприятствующим активизации рукава Быстрого, является и повышенный сток льда через этот рукав вследствие обычного заторообразования в мелководном устье Старостамбульского рукава. В целом рукав Быстрый - наиболее активный водоток в системе Килийской морской дельты и естественная тенденция его активизации должна сохраниться на ближайшие десятилетия.

Русловая сеть дельты представляет собой единую систему гидравлически взаимосвязанных водотоков. Поэтому развитие русловой сети (активизация и отмирание водотоков) и изменение стока воды как в изменяющихся, так и в смежных с ними рукавах - две стороны одного и того же процесса.

Данные об изменении распределения стока по рукавам дельты Дуная (1) подтверждают это. В последние 50-70 лет наблюдалось увеличение стока рукавов Тульчинского, Сулинского, Старостамбульского, Быстрого и уменьшение стока рукавов Георгиевского, Килийского, Очаковского, Кислицкого, Среднего, Белгородского и др.

За период 1893-1965 гг. доля стока Килийского, Тульчинского, Сулинского и Георгиевского рукавов от стока всего Дуная изменилась, соответственно, с 70 до 62,5%, с 30 до 37,5%, с 7 до 16,9%, с 23 до 20,6%.

С 1943 по 1963 гг. доля стока рукавов Среднего и Быстрого в морской дельте от стока Килийского рукава изменилась соответственно с 2,6 до 0,6% и с 13,2 до 17,3%.

Взаимовлияние перераспределения стока по рукавам и изменения морфометрических характеристик рукавов может быть исследовано с применением метода гидравлического расчета распределения стока воды по системе дельтовых водотоков (3) и метода расчета изменения морфометрических характеристик водотоков при заданном распределении стока воды по рукавам (2).

Любые естественные или искусственные изменения морфометрии рукавов (длины, ширины, глубины) влекут за собой соответствующие изменения распределения стока по водотокам дельты. Увеличение длины рукава (например, при устьевом удлинении, меандрировании, или искусственное), уменьшение поперечных размеров рукавов при их занесении увеличивают гидравлические

сопротивления рукава и вызывают уменьшение доли расхода воды данного рукава и всей его системы. Уменьшение длины рукава (например, при естественном или искусственном спрямлении излучин), увеличение поперечных размеров рукавов при их естественном размыве или искусственном выпрямлении уменьшают гидравлические сопротивления рукава и вызывают увеличение доли расхода воды данного рукава. Важно отметить, что в системе взаимосвязанных водотоков изменение морфометрических характеристик в одном рукаве вызывает изменение стока не только в этом рукаве, но и в смежных с ним и во всей системе рукавов.

Изменение расходов воды и наносов рукавов, в свою очередь, приводит к изменению их размеров, изменению интенсивности устьевого удлинения, заилению или размыву русла. Это объясняется приспособлением русла рукавов к измененным условиям стока. Увеличение водности рукава или его участка (вне зависимости от причины) приводит к размыву русла и увеличению его ширины и глубины. Уменьшение водности рукава влечет за собой заиление и повышение русла, уменьшение ширины и глубины.

Изменение морфометрических характеристик рукавов вызывает перераспределение стока. Рукава, уменьшающие свои поперечные размеры, уменьшают свой сток, увеличивающие поперечные размеры - увеличивают. Причина и следствие меняются местами, и поэтому, заливающиеся и уменьшающие свой сток рукава обычно прогрессивно отмирают, размывающиеся и увеличивающие свой сток рукава - прогрессивно активизируются.

Применение выше названных методов расчета позволило изучить процесс и причины перераспределения стока воды по рукавам всей дельты Дуная и системы Килийского рукава в прошлом и дать приближенный прогноз ожидаемого перераспределения стока в будущем под влиянием естественных процессов перестройки гидрографической сети дельты и возможных гидротехнических мероприятий.

Анализ показал, что главной причиной перераспределения стока по основным рукавам дельты в недалеком прошлом явилось искусственное спрямление и углубление Сулинского рукава в конце прошлого - начале нашего века, а также - быстрое выдвижение Килийского рукава в море (на 10-15 км за последние 145 лет).

Увеличение доли стока рукавов Быстрого и Прорвы связано с более интенсивным устьевым удлинением смежных рукавов (Старостамбульского и Потаповского), а также некоторыми искусственными мероприятиями.

Если в дальнейшем процесс дельтообразования в устье Дуная будет идти естественным путем, то следует ожидать дальнейшего уменьшения доли стока рукавов Килийского и Георгиевского. В системе Килийского рукава будут уменьшаться сток побочные рукава (Белгородский, Средний и др.). Активизируются рукава Быстрый, Старостамбульский.

Наиболее заметные изменения в распределении стока воды по рукавам дельты Дуная в будущем могут произойти при крупных искусственных мероприятиях по выправлению рукавов. Так, если будет осуществлено спрямление Георгиевского рукава, то доля стока Килийского рукава от стока Дуная может уменьшиться до 48%, Георгиевского увеличиться до 37%. Искусственное удлинение молдов в устье Сулинского рукава не должно привести к существенному перераспределению стока. Это объясняется тем, что предполагаемое удлинение молдов в устье Сулинского рукава будет проводиться только в случае значительного естественного выдвижения в море Килийского рукава. Эффект искусственного удлинения одного рукава будет поэтому компенсироваться влиянием естественного устьевого удлинения другого. Выправление коротких рукавов в системе Килийского рукава также не вызовет существенного перераспределения стока.





## 10. DISKUSSION

### Podani:

Zu Petschinow und Rajnow: Der Einfluß des Speichers "Eisernes Tor" existiert zweifellos, aber man muß auch den Einfluß der Erosion verhindernden Maßnahmen in den Einzugsgebieten der Donauzuflüsse (Stauration, Bewaldung, Arbeiten bei der Aufforstung) berücksichtigen.

Man muß ebenfalls berücksichtigen, daß im Jahre 1970 ein außergewöhnlich großer Abfluß herrschte, und - wie bekannt - hängt der Transport des Feststoffes fast zu 100% von den Hochwasserwellen ab. Deshalb ist das Abfallen der Kurve der Feststoff-Führung, das nach 1970 zu verzeichnen ist, teilweise ein natürlicher Prozess, weil da die Abflüsse klein waren.

Die Methode, die die Veränderung des Flußbeckens nach dem Bau der Staustufe Nikopol-Turnu-Măgurele prognostiziert, muß das oben Gesagte berücksichtigen.

### Burz:

Ich möchte grundsätzlich Stellung nehmen zum Generalbericht aufgrund der Erfahrungen an den bayerischen Gewässern.

Eine Vorhersage flußmorphologischer Veränderungen ist in letzter Konsequenz nur qualitativ möglich und zwar aus folgenden Gründen:

1. Der Zusammenhang zwischen Feststoffführung und den geologisch-morphologischen Größen bzw. Charakteristika des Niederschlagsgebietes ist nicht quantifizierbar.
2. Die Feststoffführung ist ein instationärer, diskontinuierlicher Vorgang. Aus diesem Grunde ist eine kurzfristige Vorhersage a priori nicht möglich, selbst mit Anwendung stochastischer-probabilistischer Methoden.
3. Die hydraulischen Methoden geben lediglich Auskunft über die Transportkapazität einer bestimmten Flußstrecke, die in den seltensten Fällen identisch ist mit der tatsächlichen Feststoff-Fracht.
4. Auch die statistische Analyse hat bezüglich der Möglichkeit einer Berechnung bzw. Vorhersage der Feststoffführung negative Ergebnisse geliefert.
5. Die weitgehenden anthropogenen Eingriffe im Niederschlagsgebiet und im Flußlauf sind in ihrer Gesamtheit nicht faßbar, daher auch nicht prognostizierbar.
6. Hieraus folgt, daß eine Vorhersage nur für bestimmte Elemente der Flußbettgeometrie und nur auf kurzen Strecken möglich ist.

### Spiegel:

Warum wurden im Beitrag von Rajnow hinsichtlich der Schwebstoffführung gerade die Jahre 1961 - 1964 mit den Jahren 1971 - 1974 verglichen bzw. welche Kriterien führten zur Auswahl der Jahre 1961 - 1964?

### Rajnow:

Die Auswahl der beiden Perioden geschah, weil 1962 - 1964 und 1971 - 1974 vergleichbar sind. Es sind fast gleiche Wassermengen, und die jährliche Verteilung der Wassermengen ist auch vergleichbar.

Petschinow:

Einige Bemerkungen bezüglich des Hauptvortrages zum Thema 5 sowie zu den Referaten "Die Prognose der Flußbettdeformation im Unterwasser der Staustufe Nikopol-Turnu-Măgurele" und "Der Einfluß des hydrotechnischen Komplexes 'Eisernes Tor' auf den Abfluß und die Schwebstoffverhältnisse der Donau" veranlassen mich, noch folgendes zu sagen: Tatsächlich sind die Maßnahmen gegen die Erosion, die im Einzugsgebiet der Donau durchgeführt wurden, ein wichtiger Faktor, unter dessen Einfluß die Verringerung der Feststoffführung und der Schwebstoffbelastung erreicht wird.

Man muß jedoch immer vor Augen haben, daß in diesem kurzen Zeitraum (1971 - 1974) nicht denjenigen Effekt einer sprunghaften Verringerung der mittleren Schwebstoffführung und der Schwebstoffbelastung zeigen können, die nach der Errichtung des hydrotechnischen Komplexes "Eisernes Tor" beobachtet wird. Es wurde auch festgestellt, daß der Einfluß der Speicher die an den Donaukanälen errichtet worden sind und die nach 1971 zur Exploitation gelangten, unwesentlich ist. Daraus folgt, daß man die beobachtete Verringerung der Schwebstoffführung der Donau nach 1971 auf der Grundlage des hauptsächlichlichen Einflusses des hydrotechnischen Komplexes "Eisernes Tor" verstehen muß.

Die Forschungen bulgarischer Spezialisten auf der Grundlage des Vergleiches der Flußbettmessungen der Donau zeigen, daß in ihnen die Auswaschung im Flußbett unter dem Einfluß des hydrotechnischen Komplexes "Eisernes Tor" einen wichtigen Platz einnimmt.

Herr Podani hat gesagt, daß rumänische Spezialisten eine höchst intensive Staurationverlandung an der Donau festgestellt haben. Dies bestätigt die von uns gewonnenen Resultate hinsichtlich der Verringerung der Feststoffführung und der Flußbettauswaschung.

Ich möchte noch einmal unterstreichen, daß die vorherrschende Theorie der Flußbettvorgänge und die angelegten Untersuchungen an Unvollkommenheit leiden, Annäherungscharakter tragen und noch immer nicht den Erfordernissen der Praxis gerecht werden.

Hinrich:

Zum Vortrag Rajnow möchte ich folgende Bemerkung machen. Kürzlich vorgenommene Untersuchungen für den Neckar und Main, also für 2 große Nebenflüsse des Rheins mit vielen Staustufen, haben ergeben, daß auf Jahre mit hohen Schwebstoff-Frachten, bedingt durch außergewöhnliche Hochwässer, Jahre mit außerordentlich niedrigen Schwebstoff-Frachten folgen. Ursache war das "Ausräumen" der Staustufenbereiche in den Hochwasserjahren und "Auffüllen" mit Sinkstoffen in den Folgejahren. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die zeichnerische Auftragung von Summenlinien für viele Jahre einen guten Überblick verschafft. Diese Summenlinien müssen die Gebietsniederschläge, Abflußsummen und Schwebstoff-Frachten enthalten. Man erkennt dann den evtl. Frachtausgleich innerhalb langer Jahresreihen für schon lange bestehende Stauregelungen. Bei neu angelegten Staustufen, wie bei dem "Eisernen Tor", wird sich vermutlich ein Knick in der Frachtsummenlinie ergeben, der nicht wieder ausgeglichen wird.

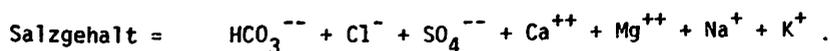
Gruber:

Herrn Kollegen Iwanow möchte ich fragen:

1. Nach welcher Methode erfolgt die Messung der gelösten Stoffe im Wasser?
2. In welcher Größenordnung (Prozent) erfolgt die Zunahme an gelösten Stoffen im Wasser im Laufe der Jahre?

Iwanow:

1. Durch chemische Analyse der Hauptionen



Es werden ein bis zwei Proben monatlich genommen.

2. Bei St. Russe (Fluß-km 496) von 50 bis 100%. Das ist wichtig, auch für die anderen Meßstellen im bulgarischen Teil der Donau.

Range:

Zum Vortrag von Professor Scheurmann: Durch die Eintiefung der Isar unterhalb der letzten Staustufe wird das Energieliniengefälle Je kleiner, die Wassertiefe  $t$  größer. Hinsichtlich des Einflusses auf das Geschriebetriebvermögen wird die Abnahme von Je gegenüber der Zunahme von  $t$  überwiegen; das Geschriebetriebvermögen und damit das Erosionsvermögen wird kleiner.

Es ist also das Erosionsvermögen am Beginn und Ende des Erosionskeils unterschiedlich - oder anders ausgedrückt: Bei einem vorgegebenen Abfluß wird das Erosionsvermögen der betrachteten in Eintiefung befindlichen Flußstrecken flüßabwärts zunehmen. Schließlich wird, ausgehend von der Staustufe bei einem bestimmten Je, das Erosionsvermögen zu Null werden; der Erosionskeil wandert flüßabwärts. Unter Berücksichtigung dieser Überlegung müßte die rein empirische Annahme eine "Sättigungsstrecke" entfallen können. Dies alles gilt unter der Voraussetzung, daß die Sohle bis in größere Tiefen einen homogenen Aufbau besitzt und kein Geschiebe "von oben" in die betrachtete Strecke nachgeliefert wird. Zusammenfassend ist zu sagen: Für die Berechnung des Erosionskeils ist also nicht nur der Massenansatz aus dem Erosionskeil und die Geschiebefracht am Ende der Erosionsstrecke zu betrachten, sondern auch eine Verminderung des Erosionsvermögens infolge der Verkleinerung des Geschriebetriebvermögens in den verschiedenen Abschnitten  $\Delta L$  der Erosionsstrecke, wobei außerdem die zeitgleich verlaufende natürliche Abpflasterung und die Sortierung zu berücksichtigen sind.

Scheurmann:

Es trifft zu, daß das Transportvermögen flüßabwärts zunimmt. Der Eintiefungskeil strebt deshalb einem Gleichgewichtszustand zu. Außer dem Massenansatz wird der Geschriebetrieb in den Teilabschnitten des Erosionskeils in die Berechnung eingeführt. Wenn sich der Fluß in Schichten mit anderer Zusammensetzung eingräbt, sind keine zuverlässigen Aussagen über die Eintiefung möglich. Die natürliche Sohlenpanzerung ist grundsätzlich zu berücksichtigen, doch stehen dem in der Praxis oft Schwierigkeiten entgegen.

Range:

Bei der Eintiefung in eine feinkörnigere Schicht geht die Erosion, wie wir gehört haben, schneller voran. Dies muß jedoch nicht nur dann der Fall sein, wenn das feinkörnigere Material als Schwebstoff transportiert wird. Wie z.B. aus der Gleichung von Meyer-Peter und Müller zu ersehen ist, ist das Transportvermögen bei kleinerem Korndurchmesser des zu bewegendem Materials wesentlich größer als bei Material mit größerem Korndurchmesser.

## 10. Д И С К У С С И Я

### Подани:

В адрес Печинова и Райнова: Влияние водохранилища "Железных Ворот" существует бесспорно, но надо учесть также влияние противозрозионных работ в бассейнах притоков Дуная (водохранилище, облесение, работы по облесению)

Надо также учитывать, что в 1970 г. был исключительно большой сток, а, как известно, транспорт наносов зависит почти на 100% от паводковых волн. Поэтому спад кривых твердого стока после 1970 года - это частично естественный процесс, т.к. потом расходы были маленькими.

Метод прогнозирования изменения русла после постройки гидроузла Никопол-Турну Магуреле должен учитывать выше сказанное.

### Бурц:

Я хотел бы основательно занять определенную точку зрения по генеральному докладу на основе приобретенного в баварских водах опыта.

Предсказание речных морфологических изменений возможно в последнем выводе лишь качественно и именно по следующим причинам:

1. Связь между стоком твердых веществ и геолого-морфологическими величинами, или характеристикой области осадков, не поддается квалификации.
2. Сток твердых веществ является нестационарным, дискретным процессом. На этой основе краткосрочный прогноз априорно невозможен даже путем применения стохастично-вероятностных методов.
3. Гидравлические методы дают лишь информацию о мощностях стока твердых веществ определенного участка реки, которая в редчайших случаях идентична фактическому стоку твердых веществ.
4. Так же и статистический анализ поставял в отношении возможности расчета, т.е. прогноза стока твердых веществ, отрицательные результаты.
5. Далеко идущие антропогенные вторжения в область осадков и в течение реки в своей совокупности неуловимы и поэтому не прогнозируемы.
6. Отсюда следует, что прогноз возможен лишь для определенных элементов геометрии речного русла и лишь для коротких участков.

### Шпигель:

Почему в докладе Райнова в отношении стока взвешенных наносов сравнивались именно 1961-1964 годы с 1971-1974 годами, или какие критерии привели к выбору 1961-1964 годов?

### Райнов:

Выбор обоих периодов произошел потому, что 1961-64 и 1971-74 поддаются сравнению. Массы воды здесь почти одинаковые и годовые распределение масс воды тоже поддаются сравнению.

Печинов:

По поводу некоторых замечаний относительно генерального доклада по теме 5 и по докладам "Прогноз русловых деформаций в нижнем бьефе гидроузла Никопол-Турну Магуреле" и "Влияние гидротехнического комплекса Железные Ворота на расход и режим взвешенных наносов реки Дунай": Действительно, противозерозионные мероприятия, проводимые в бассейне р. Дунай, являются важным фактором, под влиянием которого получается уменьшение расхода наносов и мутности воды. Следует иметь в виду однако, что они не могут в таком коротком периоде (1971-1974) оказать такой эффект скачкообразного уменьшения среднего взвешенных наносов и мутности воды, которое наблюдается после построения гидротехнического комплекса "Железные Ворота". Установлено также, что влияние водохранилищ, построенных на протоках и вошедших в эксплуатацию после 1971 года, незначительное. Из этого следует, что наблюдаемое уменьшение расхода взвешенных наносов р. Дунай после 1971 года следует понимать на основе преимущественного гидротехнического комплекса "Железные ворота".

Исследования болгарских специалистов на основе сопоставления съемок русла реки Дунай показывают, что имеет место значительный размыв в русле реки под влиянием гидротехнического комплекса "Железные ворота".

Господин Подани сказал, что румынские специалисты установили весьма интенсивное заиливание водохранилищ на р. Дунай. Это подтверждает полученные нами результаты по отношению к уменьшению расхода наносов и размыва русла.

Я хочу подчеркнуть еще раз, что существующая теория руслового процесса и подходы к его изучению страдают несовершенством, носят приблизительный характер и все еще не удовлетворяют требованиям практики.

Гинрих:

К докладу Райнова я хотел бы заметить следующее: Недавно произведенные исследования на реках Некар и Майн, т.е. двух больших притоков Рейна со многими гидроузлами (ступенями подпора) показали, что после определенных лет с высоким расходом взвешенных наносов, обусловленным чрезвычайными паводками, следовали годы с необычайно низким расходом взвешенных наносов. Причиной оказалась "эрозия" в области подпорных ступеней в паводковые годы и "наполнение" осадочным материалом в последующие годы. Исследования показали, что разработка на чертеже суммарных линий за много лет дает хороший обзор. Суммарные линии должны содержать: осадки бассейна, сумма стоков, расходы взвешенных наносов. Тогда можно определить возможное выравнивание расхода в течении длинных рядов лет для существующего или вновь создаваемых ступеней подпора, как у уже долгое время регулирования подпора. У вновь создаваемых ступеней подпора, как у "Железных ворот", по всей вероятности возникает "изгиб" в суммарной линии расхода, который не будет компенсирован.

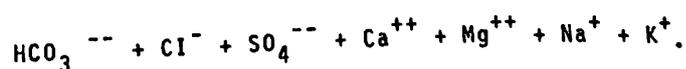
Грубер:

Господина коллегу Иванова я хотел бы спросить:

1. По какой методике производятся измерения растворенных в воде веществ?
2. С какими порядками величин (%) происходит прирост растворенных в воде веществ в течении года?

Иванов:

1. Посредством химического анализа главных ионов



Ежемесячно берутся одна или две пробы.

2. У Русе (496-ой километр реки) от 50 до 100%. Это важно и для других мест измерения в болгарской части Дуная.

Ранге:

К докладу профессора Шойерманна: Вследствии углубления реки Исара ниже подпорных наклон энергетической линии  $J_e$  уменьшается, глубина воды  $t$  увеличивается. В отношении влияния на возможность передвижения донных наносов можно отметить, что уменьшение  $J_e$  перевешивает увеличение  $t$ ; возможность передвижения донных наносов, а вместе с этим и эрозионная возможность, уменьшается.

Значит эрозионные возможности в начале и в конце эрозионного клина различны - другими словами: У заданного стока эрозионная возможность рассматриваемого участка реки, находящегося в состоянии углубления, возрастает вниз по течению. Наконец, исходя из подпорных ступеней при определенном  $J_e$ , эрозионная возможность сводится к нулю; эрозионный клин перемещается вниз по реке. При принятии во внимание этих размышлений должна иметься возможность для выпадения чисто эмпирического допущения "участка насыщения". Это все действительно при предположении, что дно вплоть до больших глубин имеет гомогенное строение и что на рассматриваемый участок не будет доставляться дополнительно "сверху" донных наносов. Резюмируя, можно сказать: Для расчета эрозионного клина можно, значит, рассматривать не только массовую насадку из эрозионного клина и стока донных наносов в конце эрозионного участка, но также и понижение эрозионных возможностей в процессе уменьшения возможности передвижения донных наносов на различных отрезках эрозионного участка, при котором, кроме того, необходимо учитывать одновременно протекающие естественное отпластывание и сортировку.

Шойерманн:

Случается, что транспортные возможности вниз по реке возрастают. Клин углубления стремится поэтому к состоянию равновесия. Кроме массовой насадки в вычисление вводится передвижение донных наносов в частях отрезка эрозионного клина. Если река закапывается в слюх с другими образованиями, то какие-либо надежные высказывания по поводу углубления невозможны. Естественное бронирование дна можно основательно принимать во внимание, но на практике это часто наталкивается на трудности.

Ранге:

При углублении в более мелкозернистый слой эрозия, как мы слышали, идет быстрее вперед. Это, однако, должно иметь место не только тогда, когда более мелкозернистый материал транспортируется как взвешенное вещество. Как, например, можно усмотреть из равенства Мейера-Петера и Мюллера, возможность транспортировки при более малом диаметре зерен передвигающегося материала значительно больше, чем у материалов, состоящих из зерен с большим диаметром.

ERGEBNISDISKUSSION UND SCHLUSSITZUNG DER DELEGATIONEN DER IHD/IHP-NATIONALKOMITEES  
DER DONAUANLIEGERSTAATEN UND DER KONFERENZTEILNEHMER

KELLER

Wissenschaftliche Erkenntnisse und Erfolge reifen langsam. Jedoch kann ich jetzt schon sagen, daß diese Konferenz mir, und hoffentlich auch Ihnen, viele Anregungen und Fakten vermittelt hat.

Ich habe den Eindruck, daß unsere Konferenz - ich schließe alle bisherigen Donaukonferenzen ein - nicht zuletzt auch deshalb wissenschaftlich ergiebig sind, weil sich die Themen auf ein vielgestaltiges, aber begrenztes Stromgebiet beziehen. Dabei ist von Vorteil, daß jeder Teilnehmer die hydrologisch relevanten Voraussetzungen, wie z.B. die Geologie, Klimatologie, Vegetation, Wirtschaft usw. kennt. Damit ist eine ausgezeichnete Basis für das Verständnis der Vorträge gegeben. Dies drückt sich dann auch in der regen Beteiligung an den Diskussionen aus. Zusammen mit 4 Generalberichten und 44 Fachvorträgen darf auch diese Konferenz als erfolgreich angesehen werden. Dabei ist es erfreulich, daß die Konferenz von insgesamt 140 Teilnehmern besucht war; unter ihnen durften wir 58 Gäste aus dem Ausland begrüßen.

Auch in der Öffentlichkeit hat die Konferenz Interesse gefunden; dies zeigen zahlreiche Berichte in Zeitungen, Rundfunk und Fernsehen. Das liegt nicht zuletzt auch daran, daß viele Fragen, die in Regensburg besprochen wurden, aktuelle und praktische Themen betrafen. Einige Beispiele möchte ich ins Gedächtnis zurückrufen.

Die Frage der Veränderung der Hochwasserwelle nach Form und Laufzeit durch den Bau von Stauanlagen und durch andere Wasserbauten war Gegenstand einer interessanten und lebhaften Diskussion zwischen den Vertretern der verschiedenen Länder. Ich erinnere auch an das Problem der Erfassung des hydrologisch wirksamen Niederschlages und seine Bedeutung für Vorhersagemodelle. Natürlich ist es am besten, den Niederschlag zu erfassen, ehe er überhaupt den Boden erreicht hat. In diesem Zusammenhang war die Mitteilung über die Versuche der quantitativen Niederschlagserfassung durch Radarmessungen von Bedeutung. Die experimentelle Phase dieser Radarmessungen ist nahezu abgeschlossen, und jetzt wird der Einsatz für die praktische Anwendung vorbereitet. Auch zu den übrigen Schwerpunkten unserer Konferenz, der Vorhersage von Eiserscheinungen, von flußmorphologischen Veränderungen, von Niedrigwasser u.a. gab es intensive Gespräche in den Sitzungen und in der persönlichen Begegnung der Wissenschaftler am Rande dieser Tagung.

Wir hoffen, daß wir die Vorträge und die Diskussionsbeiträge als Ergebnisse dieser Konferenz in nicht allzu ferner Zeit veröffentlichen können.

Ich möchte nun das Wort Herrn Kollegen Stelczer geben.

STELCZER

Sehr geehrte Damen und Herren, die erste Etappe der Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen ist beendet. In allen acht Donauanliegerstaaten wurde eine dieser Tagungen durchgeführt. Dieser VIII. Konferenz hier in Regensburg wurde das größte Interesse entgegengebracht. Hier wurden die lebhaftesten Diskussionen geführt. Die ausgezeichnete Arbeit des Organisationskomitees möchte ich mit Dank hervorheben.

Nun beginnt eine neue Runde der Konferenz. Der Organisator der ersten Konferenz, die in Budapest stattgefunden hat, übernimmt gerne die Organisation der nächsten Konferenz, die 1977 durchgeführt werden soll. Wir laden Sie herzlichst nach Budapest ein zur vorbereitenden Tagung im Jahre 1976 und zur IX. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen im Jahre 1977.

Auf Wiedersehen in Budapest.

#### ШТЕЛЬЦЕР

Многоуважаемые дамы и господа, первый этап конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам завершен. В каждом из восьми придунайских государств был проведен один из этих съездов. Эта VIII конференция здесь в Регенсбурге пользовалась наибольшим интересом. Здесь проводились наибожественнейшие дискуссии. Отличную работу организационного комитета я хотел бы подчеркнуть с благодарностью.

Теперь начинается новый круг этих конференций. Организатор первой конференции, которая имела место в Будапеште, охотно берет на себя организацию следующей конференции, которая должна быть проведена в 1977 году. Мы сердечно приглашаем вас в Будапешт на подготовительное совещание в 1976 году и на IX конференцию дунайских стран по гидрологическим прогнозам в 1977 году.

До свидания в Будапеште.

#### КЕЛЛЕР

Большое спасибо, господин Штельцер, за это приглашение в Будапешт. Вы все знаете, что коллеги из Будапешта принимали значительное участие в организацию этих конференций. Поэтому уже I конференция в первом раунде участвовавших государств имела место в Будапеште, и теперь также и I конференция второго раунда, т. е. IX конференция, будет проведена на том же месте. Аплодисменты присутствующих здесь ученых показывают вам, господин Штельцер, что ваше приглашение принимается с радостью и благодарностью.

#### KELLER

Vielen Dank, Herr Kollege Stelczner, für diese Einladung nach Budapest. Sie wissen alle, daß die Kollegen aus Budapest maßgeblich an der Einrichtung dieser Konferenz beteiligt waren. Deshalb fand bereits die I. Konferenz in der ersten Runde der beteiligten Staaten in Budapest statt, und nun wird auch die I. Konferenz der zweiten Runde, also die IX. Konferenz, am gleichen Ort durchgeführt. Der Beifall der anwesenden Wissenschaftler zeigt Ihnen, Herr Stelczner, daß Ihre Einladung mit Freude und Dankbarkeit aufgenommen wird.

Dieser Entschluß zur IX. Konferenz im Jahre 1977 sagt schon aus, daß die bisherigen Konferenzen nützlich gewesen sind. Im Verlauf der VIII. Konferenz haben sich wiederum einige aktuelle Themen, man könnte auch sagen "Lücken in der hydrologischen Forschung" als Schwerpunkte unserer zukünftigen Konferenzen angeboten. Ich möchte wiederum an einige Beispiele erinnern; dabei weiß ich, daß diese Anmerkungen nicht vollständig sein können.

Ich möchte Sie bitten, in der anschließenden Aussprache diese Themenliste zu ergänzen. So möchte ich an die Vorschläge von Herrn Kollegen Podani über wirtschaftliche Aspekte der hydrologischen Vorhersage erinnern. Damit ist einerseits die Quantifizierung der Schäden gemeint, die durch besondere hydrologische Ereignisse entstehen können und andererseits der finanzielle und materielle Nutzen, den eine hydrologische Vorhersage bringen kann. Derartige volkswirtschaftliche Überlegungen müssen in die Betrachtungen einbezogen werden.

Sodann haben die Konferenzen sich bisher bewußt weniger mit der Wasserbeschaffenheit als mit der Dynamik der Wasserstände und Abflüsse und deren Folgen befaßt. Der Grund dafür ist die Tatsache, daß die Internationale Vereinigung für Limnologie (IVL) sich mit der Wasserbeschaffenheit der Donau intensiv und erfolgreich befaßt. In Zukunft wird jedoch die Forschung zunehmend den Zusammenhang von Abflußmenge und -beschaffenheit betrachten müssen, d.h., die Kombination von Niederwasser, Mittel- und Hochwasser mit der Wasserbeschaffenheit.

Damit bin ich bei einem dritten Thema, das bei dieser Konferenz als Lücke in der Forschung auftauchte; es sind die Niedrigwasserprognosen, die grundlegende Bedeutung für die Probleme der Wasserbeschaffenheit haben. Die Sitzung über Niedrigwasserprognosen mit nur 3 Referaten, aber einer eingehenden Diskussion, hat gezeigt, daß auf diesem Gebiet der Vorhersage bisher zu wenig geforscht wurde. Eine der nächsten Konferenzen kann vielleicht zu diesem Thema einen neuen Impuls geben.

Nun noch ein Wort zu den mathematischen Modellen. Mathematische Modelle sind modern. Es rechnet sich leicht und elegant mit Computern und man kann mit Formeln einfache Zusammenhänge gelehrt und unverständlich ausdrücken, wirkungsvoll für einen Zuhörer, der nichts davon versteht. Ich weiß, das ist etwas überspitzt formuliert, aber dennoch freute mich, daß sich auf dieser VIII. Konferenz in mehreren Beiträgen erfreuliche Ansätze gezeigt haben, die Flut von Modellen im Bereich der hydrologischen Vorhersage zu systematisieren. Das fördert die Übersicht und auch die praktische Anwendung.

Sodann scheint mir das Problem der Klimaschwankungen noch nicht hinreichend berücksichtigt zu sein; ich habe dies auch in meinem Eröffnungsvortrag zu dieser Konferenz angeschnitten. Klimaschwankungen vollziehen sich keineswegs immer in der Art stetiger Schwankungen, sondern es gibt auch "Klimaverwerfungen". Die Frage, wie es kommt, daß Klimaschwankungen nicht unbedingt Abflußschwankungen zur Folge haben müssen, ist durchaus von wissenschaftlichem und praktischem Interesse. Gibt es überhaupt im Donaugebiet nachweisbare klimatisch verursachte Abflußschwankungen? Warum ist in der Abflußentwicklung vieler Flüsse kein Trend erkennbar, obwohl bei Klimaelementen oder in Gletscherschwankungen ein solcher Trend eindeutig nachweisbar ist? Trendberechnungen werden oft für Monats- und Jahresmittel des Abflusses durchgeführt, für die sich aber im Ergebnis kein Trend zeigt. Vielleicht wäre es besser, auf einer anderen statistischen Grundlage diese Untersuchungen durchzuführen. Wir wissen auch nicht, ob sich die schwer faßbaren Klimaverwerfungen in den mathematischen Modellrechnungen der Hydrologie auswirken. Durch Klärung dieser Fragen könnten den Untersuchungen zur hydrologischen Vorhersage wahrscheinlich noch mehr Sicherheit und Glaubwürdigkeit gegeben werden.

Auf dieser Konferenz sind auch die zukünftigen Veränderungen der Hochwasserwellen und der Laufgeschwindigkeiten sowie deren Folgen für die Flußbettmorphologie, die Eisverhältnisse und anderes diskutiert worden. Diese Fragen, die sich aus den Auswirkungen der Stauhaltungen und anderer wasserbaulicher und landschaftsverändernder Maßnahmen ergeben, werden wahrscheinlich noch auf vielen Konferenzen behandelt werden müssen.

Schließlich kam in einer lebhaften Diskussion auf dieser Konferenz zum Ausdruck, daß der Einfluß von Stauhaltungen, von Abwasser- und Abwärmeeinleitungen auch bei der Erforschung der Eisverhältnisse berücksichtigt werden muß. Diese Thematik sollte in Zukunft weiter behandelt werden; dabei sollten die positiven und negativen Effekte auf die Biologie und das Selbstreinigungsvermögen der Gewässer betrachtet werden.

Dies sind nur einige Hinweise auf zukünftige Arbeiten. Wir würden uns freuen, wenn auch von Ihrer Seite Vorschläge zur Thematik und Gestaltung der kommenden Konferenzen gegeben werden könnten.

#### AFANASIEV

Ich möchte nur ganz kurz auf die Bedeutung der Konferenzergebnisse für die Donaukommission eingehen. Zunächst möchte ich noch ergänzen, daß das Sekretariat der Donaukommission eine Analyse über die Anwendbarkeit von langfristigen Vorhersagen der maximalen, minimalen und mittleren Wasserstände durchgeführt hat. Es zeigt sich, daß diese Prognosen bei weitem nicht den Anforderungen der Praxis entsprechen. Bei dem gegenwärtigen Kenntnisstand ist es völlig unmöglich - ich spreche nicht von den Ergebnissen dieser Konferenz - langfristige Vorhersagen für die obere Donau zu erstellen.

Deshalb hörten wir auf dieser Konferenz mit großem Interesse eine Reihe von Vorträgen über die Untersuchungsergebnisse zur Langfristvorhersage. Es bleibt nur zu wünschen, daß diese Ergebnisse so schnell wie möglich in der Praxis Anwendung finden, damit die Qualität der hydrologischen Vorhersage verbessert werden kann.

Es war auch erfreulich zu hören, daß bei Prognosen der Niedrigwasserstände bereits Ergebnisse erzielt wurden, die gegenwärtig in der operationellen Praxis angewendet werden können.

Bei den Vorhersagen über die Eiserscheinungen ist auch ein wesentlicher Fortschritt zu erkennen. Im Rahmen der Donaukommission wurden bis jetzt keine langfristigen Eisprognosen erstellt, weil die Methoden fehlten. Ich hoffe, daß die Ergebnisse dieser Konferenz eine Änderung dieser Situation ermöglichen.

Sodann treten immer wieder neue Probleme auf, die für die Schifffahrt von Bedeutung sind. Den Vorhersagen der morphologischen Flußbettveränderungen wurde nicht zufällig so große Aufmerksamkeit geschenkt. Das hängt insbesondere mit der stürmischen Entwicklung der wasserbaulichen Maßnahmen an der Donau zusammen. Es wurden zahlreiche bestehende Wasserkraftwerke erwähnt; aber es sind auch noch eine ganze Reihe neuer Kraftwerke geplant. Im ungarisch-tschechoslowakischen Abschnitt, im jugoslawisch-rumänischen Abschnitt, im rumänisch-bulgarischen Abschnitt sind Elektrizitätswerke vorgesehen, die das hydrologische Regime beeinflussen werden. Was ich hier sage, erschöpft in keinem Maße die Bedeutung dieser Konferenz; ich möchte nur hervorheben, was mir auf den ersten Blick für die Donaukommission besonders wichtig erscheint. Den Wunsch von Herrn Podani bezüglich weiterer Vorträge über die morphologischen Besonderheiten des Donaflußbettes in einer der nächsten Konferenzen werde ich gern an das Sekretariat der Donaukommission weitergeben.

Sodann möchte ich noch auf einige persönliche Eindrücke auf dieser Konferenz eingehen. Mir scheint vor allem, daß sich auf dieser VIII. Konferenz recht deutlich herauskristallisiert hat, daß die Probleme der langfristigen Vorhersage der Niedrigwasserstände unsere zukünftigen Aktivitäten wahrscheinlich stärker bestimmen.

Natürlich gibt es viele weitere Probleme, die die "vorhersagenden" Hydrologen interessieren, aber wir müssen uns konzentrieren. Bei einigen Konferenzen der letzten Zeit - so in Budapest eine Konferenz über mathematische Modelle oder der Limnologenkongreß - nahmen natürlich auch Hydrologen mit entsprechenden Vorträgen teil; es war eine gute Zusammenarbeit. Meine persönliche Meinung ist jedoch, daß wir in dieser Konferenz trotz der gewünschten Zusammenarbeit die Thematik nicht endlos ausdehnen dürfen. Diese Konferenz sollte auf hydrologische Vorhersagen beschränkt bleiben und sich nicht unübersichtlich erweitern.

Ich möchte noch eine zweite persönliche Bemerkung machen - und ich glaube, es ist nicht allein meine persönliche Meinung. Ich danke den Organisatoren dieser Konferenz für die gute, freundliche Atmosphäre dieser Konferenz. Wir fühlten uns sehr wohl, wir freuten uns auch, die schöne Stadt Regensburg kennenzulernen. Zu der guten Stimmung trugen außerdem einige offizielle Personen bei, die leider nicht im Organisationskomitee vertreten waren, z.B. die Leiter des Wetterdienstes, die uns mit schönem Wetter versorgten. Es war gut, daß an einigen Tagen Niederschläge in der ersten Tageshälfte fielen. So blieb der Konferenzsaal auch nicht halbleer. Ich danke Ihnen.

#### KELLER

Ich danke Ihnen, Herr Afanasiev, für die Anregung. Es ist ja im Sinne dieser Aussprache, für die kommenden Konferenzen neue Impulse und Ideen zu erhalten. Was Herr Afanasiev angeschnitten hat, ist auch eine Anregung, die zu behandelnde Thematik nicht ausufern zu lassen.

#### THIESS

Ich danke Herrn Keller, daß er sich für die Entmystifizierung der mathematischen Hydrologie und der Prognostik eingesetzt hat. Zugleich möchte ich anregen, daß die Vorträge systematisch gestrafft werden. Dann würde es auch besser gelingen, in den Vorträgen nicht nur beispielsweise auf Gleichungen zu verweisen, sondern auch ihre Ableitungen zu erläutern. Sodann sollte vermehrt versucht werden, praktische Lösungsbeispiele den theoretischen Ausführungen beizufügen.

Schließlich möchte ich empfehlen, die vorgeführten Diapositive didaktisch besser aufzubauen, indem nur die entscheidenden Aussagen so dargestellt werden, daß sie vom Zuhörer in der Kürze des Vortrages voll erfaßt werden können.

#### GLASEL

Meine Damen und Herren, ich darf mich als Vertreter des Landes Österreich doch noch ganz kurz zu den Generalthemen, und damit allgemein zu den Themengruppen der Konferenz äußern. Für uns sind vor allem die Themen, die kurzfristige Wasserstands- und Abfluvorhersagen - insbesondere für Hochwässer - behandeln, die wichtigsten Probleme. Kraftwerksbauten haben in der letzten Zeit unsere Gewässer in ihren Abfluvverhältnissen erheblich verändert. Einerseits werden Oberströmungsstrecken ausgeschaltet, andererseits werden aber Oberströmungsstrecken eingerichtet. Dies bewirkt nicht unerhebliche Veränderungen im Abfluvverlauf. Schließlich werden hierdurch auch die Verfahren für eine Prognose beeinflusst. Wir versuchen nun für die Donau, die zunehmend bebaut wird, ein mathematisches Modell zu erstellen. Ich glaube, daß diese Arbeit uns die Möglichkeit gibt, die Prognosen für die Donaukommission - also für die Schifffahrt - entscheidend zu verbessern.

Wir waren von den Darlegungen der Kollegen aus der Sowjetunion über die Vorhersage von Eiserscheinungen besonders beeindruckt. Infolge der milden Winter und klimabedingt haben wir am Oberlauf der Donau eigentlich sehr wenig mit Eisproblemen zu tun. An der österreichischen Donau hat sich schon seit den Regulierungen im vorigen Jahrhundert kein Eisstoß mehr gebildet. Auch hier haben die Staustufen der Donaukraftwerke seit einigen Jahren neue Verhältnisse geschaffen. Es bilden sich jetzt nur dünne Eisdecken. Diesbezüglich fehlen uns entsprechende Erfahrungen; dasgleiche gilt für Erfahrungen über eine Vorhersage. In diesem Zusammenhang ist natürlich auch die Vorhersage infolge von Wärmeeinleitungen wichtig. Es wird bei uns derzeit ein Wärmelastplan für die Donau erstellt, und ich glaube, auch diesen Fragenkomplex sollte man auf dieser Konferenz weiter verfolgen, um die Auswirkungen für die Zukunft abschätzen zu können.

Bezüglich der langfristigen Vorhersage bin ich der Meinung, daß gerade diese Vorhersagen in den sich rasch ändernden Witterungsverhältnissen zwischen Atlantik und Mittelmeer sehr schwierig sind. Einzig bei den Vorhersagen über fluvmorphologische Veränderungen ist eine gewisse Abschätzung, und damit eine Vorhersage, über die Entwicklung von Verlandungsvorgängen in Stauräumen möglich.

Besonders habe ich die Vorschläge von Herrn Podani über die wirtschaftlichen Aspekte hydrologischer Vorhersagen geschätzt. Wir sehen es immer wieder, daß gute Vorhersagen auch in der Bevölkerung Ansehen haben. Dieses Ansehen hat ein kleines Land wie Österreich mit dem noch kleineren hydrographischen Dienst bitter nötig. Ich glaube, diese Aspekte sollten noch mehr herausgearbeitet werden, und es sollten Kosten-Nutzen-Analysen erstellt werden.

#### PARSCHIN

Zuerst möchte ich mich den freundlichen Worten anschließen, die von Herrn Stelczer und Herrn Afanasiev über die gute Organisation der Konferenz, die herzliche und freundschaftliche Atmosphäre ausgesprochen wurden. Die sowjetische Delegation und unser Land legen großen Wert auf diese Donaukonferenzen. Wir sind bemüht, die neuesten Arbeiten, die Ergebnisse der letzten Untersuchungen auf diesem Gebiet der hydrologischen Vorhersagen auf dieser Konferenz vorzutragen. So haben wir auf dieser VIII. Konferenz 18 Vorträge vorgelegt und waren bemüht, sie hier zu halten.

Ich möchte jetzt einige Bemerkungen zu präzisen Vorschlägen für die Durchführung der nächsten Konferenz machen. Sie wissen, daß zur Zeit viele internationale Symposien, Konferenzen für Hydrologie und hydrologische Vorhersagen durchgeführt werden. Unsere Donaukonferenz unterscheidet sich dadurch, daß sie eine regionale Konferenz ist, d.h., es wird ein ganz konkretes, für die Wirtschaft wichtiges Einzugsgebiet betrachtet. Man sollte auch künftig daran festhalten, überwiegend Arbeiten aus diesem Einzugsgebiet oder aber mathematische Modelle vorzutragen, die an den Gewässern dieses Einzugsgebietes geprüft werden können.

Sodann sollte der Zeitabschnitt von zwei Jahren zwischen den Konferenzen vielleicht derart genutzt werden, daß man die Regimeänderungen in diesen zwei Jahren untersucht. In diesem Sinne sollten auch weitere Fragen geprüft werden: gab es Katastrophenhochwässer, welche Maßnahmen wurden getroffen, wie kamen die Kollegen aus den verschiedenen Donauländern mit den Vorhersagen über extreme Niedrigwasserstände oder Hochwässer zurecht, welche Modelle wurden am besten ausgearbeitet usw? Mir scheint, man sollte die nächsten Konferenzen mit diesen Fragen und kurzen Mitteilungen beginnen.

Jetzt möchte ich noch einige Worte zu den mathematischen Modellen sagen. Wie Sie wissen, dringt die Mathematik gegenwärtig in alle Gebiete der Wissenschaft ein. Man sollte es schon begrüßen, daß sie auch in vollem Maße in unser Fachgebiet eindringt. Aber trotzdem muß man bei den mathematischen Modellen gleichzeitig über die Stabilität der Lösungen dieser Modelle sprechen, da nicht selten Modelle 10 oder manchmal 20 Parameter aufweisen, die in Obereinstimmung der Berechnung und der tatsächlichen Ganglinie auf umgekehrtem Wege gelöst werden. Manchmal fällt es schwer zu bestimmen, was diese Parameter darstellen, und indem wir nun die eine Seite betonen, vergessen wir Hydrologen - das bezieht sich auf die Sowjetunion - die andere Seite, d.h. die physikalische Untersuchung der Abfluvvorgänge im Einzugsgebiet, sowohl im Gelände wie im Labor oder in Versuchsgebieten, weiterhin die Infiltrationsvorgänge, die Intensität des Wassereintritts in das Einzugsgebiet usw.; im Endeffekt wird der Abfluß durch das Verhältnis zwischen der Intensität des Eintritts des Wassers in das Einzugsgebiet und der Intensität der Infiltration bestimmt. Leider befassen wir uns in der letzten Zeit nur wenig mit diesen Arbeiten, und man sollte die Aufmerksamkeit mehr darauf lenken.

Weiter sollte man auf diesen Konferenzen Fragen erörtern, die die Erweiterung der hydrologischen Beobachtungsnetze für die nationalen Hochwasserdienste betreffen. Es geht nicht darum, daß die Modelle nicht gut sind, oder daß unsere Methoden der Prognosenberechnung nicht gut sind, aber wenn das hydrologische Beobachtungsnetz im Einzugsgebiet unzureichend ist, dann wird es schwer sein, gute Ergebnisse zu erzielen. Ich möchte noch folgendes betonen: nach meinen praktischen Erfahrungen müssen die Hydrologen eng mit den Synoptikern zusammenarbeiten, die die Vorhersagen über die Niederschläge und das Wetter machen. In unserem Hydrometeorologischen Dienst in der Sowjetunion ist der meteorologische und hydrologische Dienst zusammengeschlossen, und im hydrometeorologischen Zentrum arbeiten die "vorhersagenden" Hydrologen und Synoptiker zusammen. Wir denken gar nicht darüber nach, wie man Hochwasservorhersagen ohne unsere Kollegen erstellen kann.

Zum Schluß möchte ich etwas zu der sehr wichtigen Frage der Form der Ausgabe hydrologischer Prognosen sagen. Dies ist von großer Bedeutung für die verschiedenen Zweige der Volkswirtschaft, die verschiedene Anforderungen an die Vorhersagen stellen. Man muß die Vorhersage z.B. für die Energiewirtschaft in anderer Form erstellen, als für die Binnenschifffahrt usw. Das ist eine sehr wichtige Frage zum Verständnis unserer Vorhersagen und zu ihrer Anwendung in der operationellen Praxis.

#### KELLER

Ich danke Herrn Parschin für seine Darlegungen. Viele Hydrologen haben die Mathematisierung der Hydrologie eine Zeitlang etwas überschätzt; es wurde zwar gerechnet, aber vieles wurde auch vergessen. Ich glaube, Herr Professor Parschin hat manchem Hydrologen aus dem Herzen gesprochen. Man sollte die Natur nicht ganz vergessen.

#### PENTSCHEW

Ich habe die angenehme Aufgabe, im Namen aller Teilnehmer der bulgarischen Delegation dem Organisationsausschuß für die gute Durchführung dieser Konferenz und für die uns erwiesene Gastfreundschaft herzlich zu danken. Auf dieser Abschlusssitzung möchten wir Ihnen, Herr Dr. de Haar, Herr Dr. Unbehauen und Ihren Mitarbeitern wie auch Ihnen, Herr Professor Keller nochmals persönlich für die gute Organisation der Konferenz danken. Alles war gut geplant, und die aufschlußreichen Vorträge verliefen in einer optimalen Atmosphäre. Den Eindruck unserer Delegation möchte ich kurz folgendermaßen zusammenfassen: fast alle Vorträge besaßen eine gute theoretische Grundlage, und es wurden wichtige Ergebnisse hydrologischer Untersuchungen der Donauländer erzielt. Indikator für die Aktualität und das hohe Niveau war die lebhaftete Diskussion fast während der ganzen Konferenz. Man kann sagen, daß die Konferenz ihr Ziel erreicht hat.

Ich meine, die Konferenzen der Donauländer, die von den nationalen Komitees organisiert werden, eignen sich sehr dafür, die hydrologischen Untersuchungen der Donauprobleme zu fördern. Unsere Delegation möchte für die nächste Konferenz folgende Vorschläge zur Verbesserung der Arbeit unterbreiten:

1. Wir haben den Eindruck, daß die Vorträge sehr interessant und aktuell sind und - wie bereits gesagt - ein hohes theoretisches Niveau besitzen, aber sie haben einen, man kann sagen "häuslichen" Charakter, weil es Probleme speziell einzelner Länder sind. Unserer Meinung nach wäre es gut, wenn auf den nächsten Konferenzen zusammenfassende und gemeinsame Vorträge, die das Ergebnis von Untersuchungen durch Spezialisten aus mehreren Ländern zu den wichtigsten Problemen sind, gehalten würden. Das wäre sehr nützlich, denn es erfordert einen Austausch der Arbeitsergebnisse und die Diskussion neuerer Methoden; die Untersuchungen werden eine vertiefte theoretische Grundlage haben. Es würde sich eine Integration der Untersuchungen aller Donauländer ergeben können.
2. Es wäre gut, wenn die Themen der nächsten Konferenz unserem Lande früher mitgeteilt würden, so daß die einzelnen Teilnehmer genügend Zeit hätten, die Vorträge oder - wie schon gesagt - die kollektiven Vorträge vorzubereiten.
3. Die Vorträge, die hier gehalten wurden, haben eines gemeinsam: sie beruhen fast alle auf der Anwendung mathematischer, stochastischer Vorhersagemethoden. Das scheint mir sehr einseitig zu sein. Es wäre notwendig und sinnvoll, wenn auf der nächsten Konferenz auch andere, genetische Methoden zur Erklärung der Abflußbildung behandelt würden, denn die gemeinsame Anwendung von genetischen und stochastischen Methoden trägt zu einer größeren Sicherheit bei und führt zu zuverlässigeren Ergebnissen in der Praxis. Wir hoffen, daß dies bei der nächsten Konferenz in Budapest berücksichtigt werden kann.

Ich danke Ihnen nochmals für Ihre gute Arbeit auf dieser Konferenz!

#### KELLER

Ich danke Herrn Pentschew für diese Mitteilungen. Die Themen werden auf der vorbereitenden Konferenz jeweils in dem Jahr zwischen den Konferenzen festgelegt. Es ist eine Anregung, die wir rechtzeitig erwägen müssen.

#### HLADNY

Erlauben Sie mir im Namen der tschechoslowakischen Delegation zuerst den deutschen Kollegen für die herzliche Aufnahme zu danken, für die Organisation und Vorbereitung unserer Konferenz, die in freundschaftlicher und fruchtbarer Atmosphäre verlief. Die tschechoslowakische Delegation nimmt an, daß die Ergebnisse, die in den Vorträgen und Generalberichten dargelegt wurden, für alle von Nutzen sind und eine gute Grundlage für die weitere Entwicklung der hydrologischen Vorhersagen für das Einzugsgebiet der Donau geben. Die zukünftige Richtung wurde bereits erwähnt, aber ich möchte nur noch kurz hinzufügen, daß die weitere Entwicklung der Vorhersagemethoden nicht ohne eine engere Zusammenarbeit mit der Meteorologie erfolgen kann. Das ergibt sich z.B. bei der Messung mit Radargeräten, bei Satellitenaufnahmen und bei synoptischen Prognosen.

Das ist unser Beitrag. Zum Schluß erlauben Sie mir, noch einmal dem Organisationsausschuß der Bundesrepublik Deutschland unseren Dank für die viele Arbeit auszusprechen.

#### GLASEL

Ich glaube, ein wesentlicher Vorteil dieser Konferenz war es, daß die Vorabdrucke der Vorträge allen Teilnehmern vorgelegen haben. Das hat uns einen guten Einblick in die einzelnen Vorträge gegeben. Dieser Unterlagen waren viel wichtiger als etwa die Kurzfassung der Vorträge. Wenn es also bei kommenden Konferenzen möglich wäre, solche Vorabdrucke in einfachster Form herzustellen, so wäre damit sicher allen Teilnehmern gedient. Obwohl die Generalberichte zum Teil ausgezeichnet waren, war es doch so, daß die Vorabdrucke die

Generalberichte ersetzen konnten. Damit kann man auch die Redezeit der Vortragenden etwas verlängern; doch sollte diese kategorisch auf etwa 15 Minuten beschränkt werden. So wäre den Vortragenden sicher gedient, und es müßte möglich sein, in dieser Zeit die wesentlichen Dinge darzustellen.

Sodann möchte ich persönlich und im Namen der Teilnehmer aus Österreich dem Organisationskomitee für die Durchführung dieser Konferenz danken und Ihnen gratulieren. Ich glaube, die Konferenz in Regensburg war ein Höhepunkt im Ablauf dieser Tagungen. Ich möchte vor allem auch die Arbeit der Dolmetscher, die ganz ausgezeichnet waren, hervorheben und Ihnen meinen besonderen Dank aussprechen. Mir waren die fremdsprachigen Vorträge noch selten so gut verständlich wie bei dieser Konferenz.

Schließlich darf ich mich noch bedanken für die Einladung der Bundesrepublik Deutschland, daß ich mit zwei Kollegen als Gast an dieser Konferenz teilnehmen durfte, und zwar deshalb, weil es mir anders nicht ohne weiteres möglich gewesen wäre, hierher zu kommen. Sonst hätte ich wahrscheinlich nur privat nach Regensburg kommen können, wie es einige unserer Kollegen auch gemacht haben. Hierfür danke ich nochmals herzlich, und ich danke auch Ihnen, Herr Stelczer, für die Vorbereitung und Durchführung der nächsten Konferenz; ich wünsche Ihnen hierzu viel Glück.

#### KELLER

Zu den Generalberichten möchte ich noch folgende Bemerkung machen. Sie waren ein Versuch; hierüber sollten wir auch bei der nächsten vorbereitenden Konferenz diskutieren. Die Generalberichte sollten ursprünglich nicht eine Übersicht über die dann folgenden Referate sein. Die Aufgabe der Generalberichter war nach unserer Meinung, darzustellen, was in der praktischen hydrologischen Vorhersage in den einzelnen Ländern wirklich getan wird. Wir wollten in den Generalberichten, die auf den Länderberichten und den Vorträgen basieren, hören, wie hydrologische und wasserwirtschaftliche Dienststellen in der Praxis wirklich arbeiten. Diese Absicht können wir noch verbessern. Vielleicht ergibt sich sogar, daß die reinen Mathematiker in ihren Formeln viel zu weit gehen; die Praxis kommt zur Zeit noch mit einfacheren Mitteln zu besseren Resultaten. Unsere Aufgabe ist es, die Möglichkeiten der Mathematik mit der Realität in Übereinklang zu bringen.

Da die beteiligten Länder bei diesem ersten Versuch noch sehr unterschiedliche Unterlagen lieferten, konnten die Generalberichter dieser Aufgabe natürlich nicht ganz erfüllen. Es war aber ein Versuch, den wir weiter verfolgen werden.

#### BONACCI

Ich habe die große Ehre, die Freude und das Glück, Sie im Namen der jugoslawischen Delegation begrüßen zu dürfen. Die Delegation unseres Landes hält die Ergebnisse der VIII. Konferenz für gelungen und nützlich. Theorie und Praxis erzielten gute Erfolge und Impulse. Die acht Konferenzen der Donauländer haben bisher die hydrologische Wissenschaft weiterentwickelt und ausgeweitet, und das nicht nur in unserem Bereich, das ist das Wichtigste. Und so wird es auch in Zukunft sein.

Man muß sodann unseren wertigen Gastgebern in der schönen Stadt Regensburg, in der wir uns sehr wohl fühlten, unseren Dank aussprechen.

Am Schluß der Konferenz möchte ich sagen, daß sich unsere Zusammenarbeit weiter fortsetzen wird und wir uns noch viele Male wiedersehen werden. Die jugoslawische Delegation wünscht Ihnen viel Erfolg bei der täglichen Arbeit Ihrer Institute und Behörden, bei der Ausarbeitung weiterer guter Projekte, Studien, Berichte und bei der Errichtung schöner und großer Wasserbauwerke. Viel Glück in Ihrem Leben, gute Heimreise und Aufwiedersehen in Budapest!

KELLER

Natürlich haben wir uns bemüht, die äußeren Bedingungen der Konferenz so angenehm wie möglich zu machen. Wenn zuvor der Vertreter Bulgariens - dort wo die VII. Konferenz ausgerichtet wurde - die VIII. Konferenz ins Regensburg gelobt hat, dann freut uns das ganz besonders. Es ist in Regensburg nicht ganz einfach gewesen gegenüber Varna zu bestehen. Vor allem hatten wir in Varna einen schöneren Zeitplan. Die Konferenzzeiten lagen von 8.00 Uhr bis 12.00 Uhr und von 16.00 Uhr bis 18.00 Uhr; zwischen 12.00 Uhr und 16.00 Uhr konnten wir den Strand von Varna genießen. Das konnten wir natürlich in Regensburg nicht bieten.

Abschließend möchte ich mich bei Ihnen bedanken. Ich danke nicht nur, weil es am Ende einer solchen Tagung so üblich ist, sondern weil es mir einfach ein Bedürfnis des Herzens ist. Ich bin froh, daß Sie zufrieden sind. Sie haben mehrfach Ihren Dank ausgesprochen.

Lassen Sie mich zunächst den Generalreportern danken. Mit den Generalberichten haben wir versucht, die Schwerpunkte der Konferenz zu akzentuieren und praxisnah zu gestalten. Ich möchte auch den Sitzungsleitern und den Referenten herzlich danken. Ich nenne beide im gleichen Atemzug, denn sie haben mit der Einhaltung der vorgegebenen Redezeit den Ablauf der Sitzungen erleichtert. Den Rednern danke ich ganz besonders für die Mühe der Vorbereitung ihrer Referate, die im allgemeinen - trotz der nicht ganz unberechtigten Bemerkung von Herrn Thiess zu einigen Diagrammen - verständlich dargeboten wurden.

Ich möchte all diejenigen Kollegen nicht vergessen, die Manuskripte für Vorträge zur Konferenz eingereicht haben und damit zur inhaltlichen Bereicherung der Tagung beigetragen haben, die aber leider nicht selbst nach Regensburg kommen konnten. Wir bitten, diesen Kollegen unseren herzlichen Dank zu sagen.

Einen wesentlichen Beitrag haben die zahlreichen Diskussionsredner zum Gelingen unserer Konferenz gegeben. Unsere Konferenzen haben das Ziel, das gegenseitige Gespräch zur internationalen Verständigung und zum Nutzen der Praxis zu fördern. Hierzu waren die Diskussionsbeiträge sicher eine nicht unbedeutende Hilfe.

Ich spreche diesen Dank auch zugleich im Namen des Vorsitzenden des Organisationskomitees, Herrn Dr. de Haar, aus.

Wir wissen meine Damen und Herren, daß unsere nächste Dankadresse den Beifall des Hauses finden wird. Der Dank gilt unseren Dolmetschern. Sie mußten mit vielen Schwierigkeiten fertig werden; und dies waren nicht nur fachliche Schwierigkeiten. Jeder, der an internationalen Konferenzen teilgenommen hat, weiß, wie schwierig es ist, Diskussionen dieser Art zu übertragen. Wenn wir einmal ehrlich sind, so müssen wir uns fragen, ob wirklich alle Anwesenden deutschsprachigen Teilnehmer jeden mathematischen Satz in den deutschsprachigen Vorträgen begriffen haben. Die Dolmetscher sollen nun das, was ein angewandter Mathematiker von einem anderen nur begrenzt versteht, in eine fremde Sprache übersetzen.

Ich weiß nicht, wie unsere Dolmetscher dies geschafft haben.

Außerdem mußten sie manchmal nicht nur aus dem Deutschen, sondern aus dem Bajuwarischen ins Russische übersetzen. Die große Geduld und der unermüdete Einsatz der Dolmetscher hat sehr zum Erfolg der Konferenz beigetragen. Hierfür danke ich Ihnen.

Meine Damen und Herren, es ist das Schicksal von Vorsitzenden - hier von Herrn Dr. de Haar und mir - Ihnen gegenüberzustehen und Ihren Dank und Ihre Anerkennung entgegenzunehmen, wie dies zuvor geschehen ist.

Ich denke, daß dieser Dank nicht nur für uns beide gemeint ist, sondern auch für die, die unsichtbar im Hintergrund des Saales tätig waren. Dort wirkten Damen und Herren für die Funktion des Tagungssekretariates und für die Technik. Selbst wenn in einzelnen Fällen Fehler vorkamen, so bitte ich, dies zu entschuldigen. Trotzdem zeigt Ihr Beifall, daß dieser Dank nicht unberechtigt ist.

Meine Damen und Herren, wer einmal eine internationale Konferenz vorbereitet hat, der weiß, wieviel Zeit die Vorbereitung erfordert. Die internationale Zusammenarbeit und die hieraus erfolgende Verständigung ist eine der vornehmsten Aufgaben. Die beteiligten Dienststellen und ihre Mitarbeiter, die wesentlich die vorbereitenden Arbeiten für die VIII. Konferenz geleistet haben, wollen gar nicht genannt sein; aber es ist Herrn Dr. de Haar und dem Nationalkomitee der Bundesrepublik Deutschland für das Internationale Hydrologische Programm der UNESCO ein besonderes Anliegen, den Damen und Herren des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, München, und der Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Regensburg, ganz herzlich zu danken für die wirklich großzügige Hilfe. Ich möchte erwähnen, daß zahlreiche Mitarbeiter dieser Institutionen an der Durchführung dieser Konferenz beteiligt waren. Stellvertretend für diese Mitarbeiter möchte ich Herrn Dr. Unbehauen bestens danken. Er ist selbst ein produktiver Wissenschaftler des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, und hatte kaum Gelegenheit, Vorträge von dieser Konferenz zu hören, obwohl er stets im Hause war. Im gleichen Sinne haben wir Herrn Ruhs und Herrn Schönwälder von der gleichen Dienststelle sowie Herrn Pertzsch von der Wasser- und Schifffahrtsdirektion in Regensburg zu danken. Sie alle haben viel Zeit in die Vorbereitung dieser Konferenz investiert; dies waren nicht nur Dienstzeiten, sondern es war auch Freizeit.

Sie, meine Damen und Herren, waren vorbildliche Konferenzteilnehmer. Sie sind über Grenzen hinweg ein Kreis von Freunden, und ich wünsche uns allen, daß wir uns in diesem Kreis 1977 in Budapest gesund, zufrieden und froh wiedersehen.

#### Zum Abschluß der VIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen

##### DE HAAR

Meine sehr verehrten Damen und Herren, ich will jetzt nicht mehr lange sprechen. Das, was ich seitens des Organisationskomitees zu sagen hätte, hat Ihnen Herr Professor Keller eben zu einem großen Teil gesagt. Ihnen allen, die Sie an dieser Tagung mitgewirkt haben, möchte ich meinen Dank aussprechen. Auch möchte ich danken für die anerkennenden Worte, die Sie dem Organisationskomitee haben zukommen lassen.

Sie haben in diesen Tagen die Gelegenheit wahrgenommen, Ihre Arbeitsergebnisse und Ihre neuesten Forschungen vorzustellen. Das ist immer ein Wagnis, denn Neues bestätigt sich immer erst dann, wenn es der Kritik Ihrer Fachkollegen standhält. So sind Hypothese, These und schließlich Kritik die Basis der Fortentwicklung aller Erkenntnis, und ich bin ganz sicher, daß die bisherigen Konferenzen auf dieser Basis gestanden haben. Ich verfolge Ihre Arbeit jetzt seit mehr als 10 Jahren, und ich habe den Eindruck, daß Ihnen ein stetiger Fortschritt gelungen ist. Dieser gelingt Ihnen durch den ständigen Gedanken- und Erfahrungsaustausch und durch Kontakte, die zur Zusammenarbeit verschiedener Institute führte. Hierzu hat nicht zuletzt auch beigetragen, daß die persönlichen Beziehungen sich vertieften. Ich würde mich freuen, wenn auch diese Konferenz hierzu einen Beitrag geleistet hat.

Unsere Konferenz ist noch nicht zu Ende; wir stehen nur am Ende der Vortragsveranstaltung. Denen, die uns jetzt verlassen, und nicht mehr an der Exkursion teilnehmen können, wünsche ich eine gute Heimreise, und Ihnen allen, meine verehrten Damen und Herren, guten Erfolg bei Ihrer weiteren Arbeit, bis Sie dann in zwei Jahren erneut zum Erfahrungsaustausch über hydrologische Vorhersagen in Budapest zusammentreffen werden.

Mit diesen Wünschen beschließe ich die VIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen.

Завершение VIII конференции придунайских стран по гидрологическим прогнозам

Де Гаар

Мои многоуважаемые дамы и господа,

я не хочу сейчас долго говорить. Большую часть того, что я должен был вам сказать со стороны организационного комитета, вам только что уже сказал господин профессор Келлер. Вам всем, принимавших участие в этом съезде, я хотел бы выразить свою благодарность. Также я хотел бы поблагодарить вас за те похвальные слова, которые вы направили в адрес организационного комитета.

Вы пользовались в эти дни возможностью представлять коллегам результаты своих работ и своих новейших исследований. Это всегда является риском, так как новое утверждается лишь тогда, когда оно выдерживает критику ваших квалифицированных коллег. Так гипотезы, тезисы и, наконец, критика являются базисом для дальнейшего развития всех познаний, и я полностью уверен в то, что предыдущие конференции стояли на этом базисе. Я слежу за вашей работой теперь уже более чем на протяжении 10-ти лет, и у меня сложилось впечатление, что вам удастся неуклонный прогресс. Он удастся вам посредством постоянного обмена мнениями, опытом и посредством контактов, которые привели к сотрудничеству различных институтов. И не в последнюю очередь сюда внесен вклад посредством углубления ваших личных отношений. Я был бы рад, если и эта конференция внесла сюда свой вклад.

Наша конференция еще не закончилась; мы стоим лишь перед завершением мероприятий, связанных с докладами. Тем, которые нас теперь покидают и не смогут больше участвовать в экскурсиях, я желаю счастливого пути на родину, и вам всем, мои многоуважаемые дамы и господа, хорошего успеха в вашей дальнейшей работе, до новой встречи для обмена опытом по гидрологическим прогнозам через два года в Будапеште.

С этими пожеланиями я объявляю VIII конференцию придунайских стран по гидрологическим прогнозам закрытой.



Öffentlicher Festvortrag anlässlich der  
VIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen in Regensburg<sup>+</sup>

DIE DONAU

K. Stelzer

РЕКА ДУНАЙ

К. Штельцер

Die VIII. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen. Diese schlichte Bezeichnung kennzeichnet eine erfolgreiche Initiative und anderthalb Jahrzehnte dauernde, großartige Zusammenarbeit der Hydrologen in den Donauländern.

Zur Förderung der Wissenschaft, zur Verhütung von Naturkatastrophen in den einzelnen Ländern und zur Verringerung der möglichen Schäden wurde von den Leitern der hydrologischen Dienste und von den Fachleuten der Donaustaaten auf der 1961 in Ungarn abgehaltenen ersten Konferenz beschlossen, regelmäßig alle zwei Jahre völlig zwanglos ähnliche Tagungen zu veranstalten.

Mit dieser VIII. Konferenz ist die erste Runde der Konferenzen abgeschlossen. In jedem der acht Donaustaaten wurde eine dieser bedeutenden Tagungen der Wissenschaftler und der in der Praxis tätigen Fachleute veranstaltet.

Um die wachsende Bedeutung und das steigende Interesse an der Konferenz über das Vorhersagewesen zu veranschaulichen soll erwähnt werden, daß bei der I. Konferenz in Budapest sieben, an der II. in Graz fünfzehn und 1971 in Kiew bereits 53 Berichte eingereicht wurden und die Zahl der Teilnehmer bereits an die Hundert angestiegen war.

Von noch größerer Bedeutung ist jedoch die Regelmäßigkeit dieser Konferenzen. Wissenschaftliche Zusammenarbeit ähnlicher Natur, die keinem formalen, internationalen Organ untersteht, gibt es auf anderen Gebieten nicht. Die Konferenzen wurden 16 Jahre hindurch regelmäßig alle zwei Jahre ohne Schwierigkeiten erfolgreich veranstaltet.

Selbstverständlich leistete zur Veranstaltung der Konferenzen die für die Donau am meisten zuständige, internationale Organisation, nämlich die Donaukommission, einen wesentlichen Beitrag. Ebenfalls wertvolle Unterstützung kam auch von den nationalen Komitees der von der UNESCO 1965 eingeleiteten, weltweiten hydrologischen Zusammenarbeit, der Internationalen Hydrologischen Dekade.

Die Donau stellt somit auch in unserer Zeit ein wichtiges Verbindungselement zwischen den Völkern dar, die ihre Ufer bewohnen. Der modernen Technologie entsprechend erfolgt diese Verbindung über Funk, Fernsprech- und Fernschreiblinien, Rechenautomaten und mathematische Modelle zur Zeit von Hoch- und Niedrigwässern mittels Vorhersagen und Datenvermittlung. So werden Hochwasserschutz und Wasserverkehr, ferner die Lösung wasserwirtschaftlicher Probleme in den einzelnen Staaten erleichtert.

Ich habe absichtlich den Ausdruck "auch in unserer Zeit" benutzt, da seitdem die Donau während der Erwärmungsperiode nach der ersten Vereisung im Pleistozän auf der Karte von Europa erschienen ist und diese sie in ihrer heute bekannten Form geprägt hat, spielt sie ununterbrochen eine geschichteformende, und kulturvermittelnde Rolle. Die Sinanthropus Urmenschen zogen aus dem Süden in das Donaugebiet, wo sie sich ansiedelten. Die Schädel- und andere Knochenreste, die im Kalkstein erhalten gebliebenen Fußabtritte, Herde, Reste von Wohnstätten und Küchenabfällen wurden in der Nähe der berühmten Warmquellen bei Vétesszőllös in Ungarn ausgegraben.

<sup>+</sup> veranstaltet gemeinsam mit der Volkshochschule Regensburg, 29.9.1975

Организована вместе с Вечерним Университетом в Регенсбурге в 29.IX.1975 г.

Vor 25 bis 60 Tausend Jahren, in der Periode des neanderthaler Menschen, war das gesamte Donaugebiet bereits besiedelt.

Die archäologischen Funde aus in der Nähe des Eisernen Tores, am rechten Ufer der Donau gelegenen Ortes Lepenski Mir, sowohl wie jene aus Tartasia am Marosch Fluß zeigen 5 bis 6 Tausend Jahre alte Runenzeichen, die auf eine Verwandtschaft mit der sumerischen Schrift hinweisen. In Lepenski Mir wurden aus dem Granitgeröll der Donau gehauene Menschenfiguren ausgegraben. Die berühmte Venus Statue aus Willendorf deutet ebenfalls auf die Blüte der vorgeschichtlichen Aurignac Kultur.

Vor rund 4 000 Jahren führte bereits die "transkontinentale Straße" entlang der Donau. Diese Straße war einerseits organischer Teil der aus Jütland nach dem Süden führenden Bernsteinstraße, andererseits bildete sie den Transportweg für die Mannigfaltigkeit und Fülle der mittelminotischen Waren aus dem Nahen Osten.

Der ersten aus 2 200 vor unserer Zeit stammenden Karte ist zu entnehmen, daß in der Bronze-Zeit die Völker entlang der Donau bereits geordnete Siedlungen, sogar Städte erbauten. Die aus 1 800 bis 1 000 vor unserer Zeit stammenden Funde bestätigen die bedeutende Rolle der Donau im Warenverkehr.

Die ersten Aufzeichnungen sowohl vom griechischen Dichter Hesiodos aus 800 vor unserer Zeit als auch jene von Herodot drei Jahrhunderte später berichten über den Ister.

Im mächtigen Wirbel der Völkerwanderungen drangen die Kelten vom Westen her entlang der Donau ostwärts und brachten mit sich die Kultur des Eisens, eines Metalles härter als die Bronze. Aus der Süd-Ukraine zogen die Skythen ebenfalls entlang der Donau vorwärts, aber in einer den Kelten entgegengesetzten Richtung. Die Römer, aus dem Süden kommend, drangen bis zur Donau vor.

Aus der Römerzeit stammen schon viele Angaben. Im zweiten Jahrhundert beschrieb Plinius ausführlich die Donau vom Quellgebiet bis zur Mündung. Die Kette der entlang der Donau erbauten Festungen mit dem Fluß und mit der Römerstraße sperrten das römische Reich nach Norden hin ab. Es würde zu lange dauern, sämtliche Festungen der Römer an der Donau aufzuzählen. Die am weitesten im Norden und Westen gelegene Donaustadt wurde hier in Regensburg mit dem Namen Castra Regina am Ort einer größeren, bereits bestehenden keltischen Siedlung von Kaiser Marcus Aurelius 179 nach der Zeitenwende gegründet. Die bei dieser Gelegenheit erstellte Gedenktafel und die Porta Prætoriana verkünden bis heute die Macht des römischen Reiches.

Die Donau bedeutete für die Römer nicht nur eine passive Linie der Verteidigung, sondern sie spielte auch als Verkehrsweg eine wichtige aktive Rolle. Die Römer unterhielten auf der Donau eine mehrere hundert Einheiten zählende Kriegsflotte, unter deren Schutz sie regen Handel betrieben. Um die Hindernisse bei der Bergfahrt leichter zu überwinden, bauten sie entlang des Flusses vom Unterlauf bis Regensburg einen Treidelweg aus. Der Winterhafen der römischen Donaustadt war Sextana Prista, das heutige Russe. Den schwierigsten Abschnitt beim Bau des römischen Treidelweges bildeten die steilen Felswände der Kataraktenstrecke. Die Bauarbeiten wurden 33 nach der Zeitenwende von Kaiser Tiberius in Angriff genommen, konnten aber erst von Kaiser Trajan 117 beendet werden. Nach den Plänen des aus Damaskus stammenden Apollodoros wurde bei der römischen Festung Drubeta, das heutige Turnu Severin, eine von 16 Steinpfeilern getragene, ständige Holzbrücke errichtet. Die Römer führten auch Flußregulierungsarbeiten aus. Sie bauten sogar einen 3,2 Kilometer langen Schiffahrtskanal, um die schwierigsten Kataraktenstrecke am Eisernen Tor zu umfahren. Drei in den Felsen gehauene Gedenktafeln verkünden heute noch den Ruhm der bauenden Kaiser und die Leistung der an der Bauarbeit beteiligten Legionen. Aus der Zeit nach dem Sturz des römischen Reiches stehen uns nur spärliche Angaben zur Verfügung.

Um 370 nach der Zeitenwende entstand die erste bekannte kartographische Darstellung der Donau, die Peutingerische Tafel im Itinerarium von Castorius.

Karl der Große verfügte über eine mächtige Kriegsflotte an der Donau, woraus zu schließen ist, daß die

Handelsschiffahrt ebenfalls rege war. Er dachte als erster an die Verbindung von Donau und Rhein. Die Bauarbeiten am Kanal, die Fossa Karolina genannt, deren Reste heute noch aufzufinden sind, liefen 793 an, wurden aber bald abgebrochen. Im IX. Jahrhundert stellte die Donau den Weg nach Osten dar. Trotz mannigfaltiger Schwierigkeiten wuchs der Verkehr stetig. Für die Donau galt auch der Spruch "Schiffahrt tut Not".

Die bis in jüngste Zeit spürbare, geschichteformende Rolle der Donau entwickelte sich im Mittelalter. Von 1054 bis zum Ende des XV. Jahrhunderts zogen die Kreuzfahrerscharen verschiedener Staaten und Völker, angeführt von Kaisern, Herzögen entlang der Donau zum Heiligen Land. Ihre Kriegsausrüstung beförderten schwere Galeeren an der Donau.

Am Anfang des XIII. Jahrhunderts, nach der vernichtenden Niederlage der an der Kalka versammelten Heere der russischen, ukrainischen und kunischen Fürsten durch die mongolischen Horden unter Batu Khan, betrachtete der Ungarnkönig IV. Béla die Donau als die letzte Linie der Verteidigung. In einem Brief an den Papst bezeichnete er den Fluß als das Wasser des Widerstandes, als "Aqua contradictionis".

Im XVI. Jahrhundert zog das vordringende Ottomanenreich der Donau entlang nach Mohács (1526) und einige Jahre später gegen Buda und Wien.

Sultan Suleiman führte sechs Feldzüge, immer dem Lauf der Donau folgend, so auch 1529, als sein Heer Wien belagerte.

Die mächtigen Truppenbewegungen der Ende des XVII. Jahrhunderts gegen die Türken anlaufenden Befreiungskämpfe waren ebenfalls an den Lauf der Donau gebunden. Im bulgarischen Befreiungskrieg Ende des letzten Jahrhunderts eilten die russischen Truppen des Zaren den Bulgaren an der Donau zu Hilfe.

Im Interesse der regen Schiffahrt erschienen zunehmend genauere kartographische Darstellungen der Donau. Die berühmte Ebstorfer Weltkarte von 1235, die portolanischen Karten von 1310, oder die wahrscheinlich von Cusanus 1491 gezeichnete, die gesamte Donau von der Quelle bis zur Deltamündung ausführlich darstellende Karte sind Beweise der Bedeutung des Stromes für den Verkehr.

In ihrem 2 860 Kilometer langen, wunderschönen Lauf bewältigte die Donau selbst mehrere gewaltige Naturhindernisse. Zwischen Donaueschingen und Sigmaringen durchbrach sie die schwäbische, zwischen Kloster Weltenburg und Kehlheim die fränkische Jura, wobei in den Engen die weißen Felswände bis zu 100 m hoch über die Wasseroberfläche hinaufragen. Obwohl ihr Quellgebiet näher zur Nordsee liegt und der Lauf in dieser Richtung ein einfacherer und leichter gewesener wäre, unternahm die Donau den mehrmaligen Durchbruch mächtiger Gebirgszüge, wie Alpen und die Karpathen, die weite Schleife um das abgetragene Massiv der Dobrußtscha, um sich in das ferne Schwarze Meer zu ergießen.

Neben ihrer bezaubernden Naturschönheit stellen aber die einzelnen Durchbrüche oft Hindernisse für die Schiffahrt dar. Einige bedeuten schwierige Probleme für den Flußbauingenieur, während andere sich bloß durch menschliches Geschick bewältigen lassen. So konnte mit den "Ulmer Kähnen", wie sie in Wien bezeichnet wurden, oder mit den "Wiener Flößen" nach Ulmer Redensart, von 1712 zwei Jahrhunderte hindurch ein regelmäßiger Schiffsverkehr von Ulm bis nach Wien, ja sogar bis weit nach Ungarn aufrecht erhalten werden. Am Ende des XVII. Jahrhunderts bestand die österreichische Donaumarine aus mehr als 5 000 Kriegsschiffen. Die Strecke Ulm-Regensburg gehörte immer zu den schwer schiffbaren Flußabschnitten. Dennoch entschied sich Kaiser I. Franz nach seiner Krönung in Frankfurt, auf dem Wasserweg aus Ulm nach Wien zurückzukehren. Er bestieg mit seiner Frau Maria Theresia und mit seinem Geleit das Schiff am 19. Oktober 1745, und die aus 33 "Ulmer Kähnen" bestehende Flotte kam bereits am 27. Oktober heil in Wien an. Der wachsende Verkehr an der österreichischen Donau veranlaßte den Kaiser, die Regulierung der für die Schiffahrt äußerst gefährlichen Strudel und Wirbel anzuordnen.

Gegen Ende des XVIII. Jahrhunderts war die Schifffahrt auch auf der mittleren Donau sehr rege. Der wachsende Verkehr an der oberen Donau rückte den Gedanken einer Verbindung mit dem Rhein über den Main in der ersten Hälfte des XIX. Jahrhunderts nahe. Von 1836 bis 1846 wurde der Ludwig Kanal zwischen Kelheim und Bamberg fertiggestellt. Mit Kähnen bis zu 100 Tonnen Tragfähigkeit wurde der Kanal bis 1943 befahren.

Die Bauarbeiten am Franz Kanal, der die Donau mit der Theiss verbindet, wurden 1792 in Angriff genommen. Später kam der bei Baja abzweigende Speisekanal hinzu.

Fast unüberwindbare Schwierigkeiten bereitete für die Schifffahrt die 130 Kilometer lange Kataraktenstrecke, wo die Donau den letzten Gebirgszug der südlichen Karpathen und deren Fortsetzung, das östliche serbische Erzgebirge durchbricht. Dieser mächtige Flußdurchbruch, der das pannonische Becken mit der wallachischen Tiefebene verbindet, wird mit Recht als das größte Erosionstal in Europa bezeichnet. Näher betrachtet schneidet die Donau an den Stromschnellen vier Felszüge durch, zwischen denen sich drei weite Becken gebildet haben. Ober den Stromschnellen floß das Wasser mit einer Geschwindigkeit bis zu 5 Meter pro Sekunde ab, wobei die Wassertiefe geringer als 0,5 Meter blieb. Bei Niedrigwasser war ein Schiffsverkehr über die Kataraktenstrecke praktisch unmöglich.

Ober die Stromschnellen konnten selbst leichte Wasserfahrzeuge mit geringem Tiefgang nur mit erheblichen Verlusten durchgelotst werden, und bei den gefährlichen Stellen mußte oft die gesamte Ladung auf Pferdefuhrwerke umgeschlagen werden. Nach dem Erscheinen des Dampfschiffes ließ sich die Regulierung der Kataraktenstrecke nicht länger aufschieben.

Die ersten Schritte in dieser Richtung unternahm noch auf nationaler Basis Ungarn 1833, unter der Leitung von Stefan Széchenyi. Die Schifffahrt am meisten hindernden Felsklippen wurden abgesprengt und am linken Ufer wurde ein Treidelweg gebaut. Als Ergebnis dieser Bauarbeiten konnte das erste Dampfschiff am 14. April 1834 die Kataraktenstrecke passieren, und somit wurde die Möglichkeit der Schifffahrt bis zum Schwarzen Meer geschaffen.

Die zweite, großzügigere Regulierungsarbeit wurde bereits in internationaler Zusammenarbeit von 1890 bis 1897 durchgeführt. Die Bauarbeiten wurden weiterhin von Ungarn geleitet, durch ausländische Anleihen finanziert und aus den Gebühren der passierenden Schiffe zurückbezahlt.

Außer ungarischen Unternehmen nahmen an den Arbeiten der braunschweiger Industrielle Hugó Luther und die berliner Disconto Gesellschaft teil. Für seine Verdienste bei der Regulierung der Kataraktenstrecke wurde Hugó Luther vom VDI 1875 die Grashof-Gedenkmedaille verliehen.

Das Ziel des mächtigen Unternehmens war, auch bei Niedrigwasser eine 2,00 m tiefe und 60 m breite Schifffahrtsrinne zu schaffen. Die rechtliche Grundlage der Arbeit bildete das Berliner Abkommen von 1878.

Das Ausmaß der damaligen Arbeiten soll durch einige Bilder veranschaulicht werden: die Kataraktenstrecke der Donau, die Absprengung der Grebener Nase.

Es dürfte von Interesse sein zu bemerken, daß die Grebener Enge, Sporn Greben, im Alterum historische Bedeutung erlangte, da die Römer nur den oberhalb liegenden Abschnitt als Danubius bezeichneten, während der Unterlauf als Ister erwähnt wird.

Kennzeichnend für die Bedeutung der Arbeiten ist, daß vom Verkehrsministerium der russischen Regierung wiederholt Professor Timonow, der bekannte Flußbauingenieur, zu ihrem Studium entsendet wurde, der über seine Erfahrungen in einer ausführlichen Monographie Bericht erstattete.

Nach der Fertigstellung der Arbeit passierte am 27. September 1896 das mit den Flaggen sämtlicher Donauländer geschmückte Schiff I. Franz Joseph das Eiserne Tor, mit Kaiser Franz Joseph, den serbischen und ru-

mänischen Königen und den diplomatischen Vertretern sämtlicher in der internationalen Zusammenarbeit teilnehmenden Staaten an Bord. Die Donau eröffnete damals die Möglichkeit einer konstruktiven Zusammenarbeit zwischen den Anrainerstaaten.

In der nächsten Zukunft wird die Donau als Teil der quer durch Europa verlaufenden internationalen Wasserstraße fast sämtliche Völker des Kontinentes verbinden.

Das mächtige Unternehmen, das Einzugsgebiet der Donau durch den Rhein-Main-Donau Kanal mit dem Wasserstraßennetz West-Europas über den Rhein zu verbinden, ist zur Zeit eines der größten Wasserbauvorhaben in Europa. Nach ihrer Fertigstellung wird die 3 500 Kilometer lange, leistungsfähige Wasserstraße eine direkte Verbindung zwischen den bedeutendsten industriellen und landwirtschaftlichen Gebieten West-, Mittel- und Ost-Europas herstellen und dadurch zur Grundlage der wirtschaftlichen Entwicklung in ihrem Einzugsbereich werden.

Es dürfte nicht uninteressant sein zu erwähnen, daß ein sehr früher Protagonist der Donau-Rhein Verbindung Graf Edmung Széchenyi war, der mit seiner kleinen Dampfyacht "Hableány" von Budapest zur Weltausstellung nach Paris fuhr.

Der Ausbau des Rhein-Main-Donau Kanals eröffnet großartige Perspektiven für Europa. Der Anschluß der Donau an weitere Wasserstraßennetze rückt dadurch in den Bereich der wirtschaftlichen Möglichkeit. Es sei hier an erster Stelle an die Verbindung mit den Nord-Europäischen Wasserstraßen der Elbe und der Oder über die March verwiesen. Dadurch wäre nach den Hauptstädten von Österreich, Ungarn, Jugoslawien auch die Hauptstadt der Tschechoslowakei, Prag, direkt mit der Donau verbunden. Die Wasserstraßen des Rheins und der Elbe stehen bereits über den Mittellandkanal in Verbindung, wodurch der Anschluß an das Donaunetz weiter betont wird. Von den Ost-Europäischen Wasserstraßen kann der Dnieper über die Pripiat-Bug-Weichsel an das Elbe-Oder System angeschlossen werden. Der Ausbau des Rhein-Main-Donau Kanals wirkt jedoch auch auf so weit entfernte Wasserwege wie den Wolga-Don Kanal zwischen dem Schwarzen Meer und Kaspischen Meer und das nördliche Kanal System in der Sowjet Union.

Die Schifffahrt an der Donau hat schon heute bedeutende Ausmaße erreicht. Der gesamte Bestand an Frachtschiffen der Donauländer betrug 1971 bereits 4 235 Einheiten mit einer gesamten Tragfähigkeit von 2,8 Millionen Tonnen.

Die Entwicklung läßt sich am besten durch die Transportleistung der gesamten Handelsflotte veranschaulichen, die sich im vergangenen Jahrzehnt (1960 bis 1970) mehr als verdoppelte, von 25 auf 55 Mio t pro Jahr. Nach Inbetriebnahme des Rhein-Main-Donau Kanals ist ein bedeutender Zuwachs der heutigen Transportleistungen zu erwarten. In erster Linie wird der Anteil der Bundesrepublik ansteigen, aber mit dem Erscheinen von Schiffen anderer Staaten, wie Belgien, Holland, Frankreich und der Schweiz muß auch gerechnet werden.

Die Verknüpfung der großen Wasserstraßensysteme der Donau und des Rheins erfordert auch die Gewährleistung der ungehinderten Schifffahrt, die Regulierung der Donau auf neuen Grundlagen. Beim Bau der ersten Staustufe bei Passau, des Kachletwerkes 1927, also fast vor 50 Jahren, dachten vielleicht nur wenige daran, welche entscheidende Rolle das Projekt für die Regulierung der Donau spielen wird. Es wurde das Vorbild der fast 50 erbauten oder geplanten Staustufen an der Donau. Die natürlichen Abflußverhältnisse des Stroms werden durch die Regulierung mittels der Staustufen wesentlich verändert und der Fluß wird in einen künstlichen Kanal verwandelt. Damit verbunden tritt die Nutzung des gewaltigen Energievorrates der Donau in den Vordergrund. Die Donau wird nicht nur ein Schifffahrtsweg, sondern eine Kraftwasserstraße, die durch die Wasserkraft Möglichkeit bietet zum weiteren wirtschaftlichen Aufschwung der Anrainerstaaten.

Die ausbaufähigen Energievorräte der Donau können im Energieband dargestellt werden. Der Energievorrat wird weitgehend vom Spiegelgefälle bestimmt, aufgrund dessen die Donau in vier Abschnitte unterteilt werden kann:

1. Quellgebiet - Ulm mit steilem Gefälle
2. Ulm-Dévény (Marchmündung) mit einem mittleren Gefälle von 50 cm/km.
3. Dévény - Turnu Severin, mit einem mittleren Gefälle von 10 cm/km.  
Selbstverständlich weisen einzelne kurze Bereiche stärkeres Gefälle auf, so zum Beispiel die 60 km lange Strecke unterhalb von Bratislava und die Kataraktenstrecke am Eisernen Tor.
4. Von Turnu Severin bis zur Mündung beträgt das mittlere Gefälle 4 cm/km.

Ein zweiter Kennwert des Energievorrates ist die Wasserführung, deren mittlere Werte in  $\text{m}^3/\text{sec}$  in einem Diagramm dargestellt sind. Wie ersichtlich, verursachen darin die Zubringer wesentliche Veränderungen. Zum Beispiel steigt die Wasserführung unterhalb von Passau auf den doppelten Wert an, und dadurch wird die Nutzung der Wasserkraft bereits wirtschaftlich attraktiv.

Unter Berücksichtigung der beiden Kennwerte wurde von der Österreichischen Donaukraftwerke AG das Profil der Energievorräte zusammengestellt, dem der Energiegehalt der einzelnen Donauabschnitte entnommen werden kann. Bemerkenswert ist zum Beispiel die Tatsache, daß der gesamte ungarische Donauabschnitt eingestaut werden müßte, um die Leistung eines einzigen österreichischen Donaukraftwerkes zu erzielen. Für den Ausbau der Kraftwerke sind die Verhältnisse zwischen Passau und Bratislava, ferner die von Belgrad bis Turnu-Severin die günstigsten.

Im Interesse der künftigen Rhein-Main-Donau Großwasserstraße müssen auch an der oberen Donau mit Schleusen ausgestattete Staustufen zum Zweck der Flußregulierung errichtet werden, wo der Bau von Kraftwerken zur Erzeugung von Energie wirtschaftlich nicht vertretbar wäre.

Der Rhein-Main-Donau Kanal erreicht die Donau bei Kelheim.

Am Lauf der Donau stellt Kelheim einen besonderen Punkt dar. Wozu die Donau im Naturzustand nicht geneigt war, nämlich ihre Gewässer in den näher zum Quellgebiet liegenden Atlantik zu schütten, wird dies jetzt von Menschenhand vollbracht.

Kelheim wird zu einer besonderen Donauquelle, und zwar für den Rhein.

Die Donauquellen scheinen immer etwas besonders an sich zu haben. Bereits Herodot und Aristoteles haben sich seinerzeit Gedanken darüber gemacht, wo die eigentliche Quelle der Donau zu suchen sei. Sollte der Zusammenfluß der zwei Bächlein, der Brigach und der Breg den Anfang der Donau bedeuten? So ist es in den Schulbüchern zu lesen. Die Frage ist jedoch bei Weitem nicht so einfach, da wir noch vor der Vereinigung der Brigach und der Breg im Schloßpark von Donaueschingen eine Quelle finden, auf der die Inschrift Donau-Quelle zu lesen ist. Diese Quelle ergießt sich jedoch bereits nach 100 m in die Brigach und kann deshalb nicht als der wahre Ursprung der Donau angesehen werden. Möglicherweise ist dies die Quelle der Breg, die weit höher, in 1 078 m Höhe einem schwer zugänglichen Gebiet des Schwarzwaldes entspringt.

Die Einmündung bei Kelheim trennt die Donau in zwei Abschnitte auch hinsichtlich der Regulierung.

Unterhalb von Kelheim sind an der Donau Regulierungsbauwerke im Interesse der Schifffahrt notwendig. Den Empfehlungen der Internationalen Donaukommission entsprechend ist zwischen Regensburg und Wien eine einheitliche Fahrrinne von 150 m Breite und 2,7 m Tiefe vorzusehen. Die Gewinnung von elektrischer Energie muß selbstverständlich mitberücksichtigt werden. Im Abschnitt Kelheim-Regensburg-Passau ist der Bau von insgesamt 8 Staustufen vorgesehen, wovon eine seit 1927 arbeitet und weitere zwei sich im Bauzustand befinden. Bei drei der Staustufen ist zur Zeit kein Kraftwerk geplant. Die fünf Kraftwerke werden eine durchschnittliche Jahresarbeit von 1,4 Milliarden kWh erbringen.

Eine Kette von 19 Staustufen befindet sich im Ausbau oberhalb von Kelheim bis Ulm zur Gewinnung von weiteren 1,4 Milliarden kWh pro Jahr. Elf dieser Staustufen sind bereits fertiggestellt.

Die großzügige Arbeit wird von der in München seßhaften Rhein-Main-Donau AG durchgeführt.

Die günstigsten Voraussetzungen für die Gewinnung von Wasserkraft bestehen in Österreich, wo starkes Gefälle und ausreichend große Abflüsse vorhanden sind. Es ist daher selbstverständlich, daß in Österreich der Ausbau der Kanalisation des gesamten, 350 Kilometer langen Donauabschnittes bereits 1940 in Angriff genommen wurde und seit 1950 planmäßig vorangetrieben wird. Die Bauarbeiten werden voraussichtlich in den 1990er Jahren, also ungefähr bis zur Fertigstellung des Abschnittes Kelheim-Passau durch die Bundesrepublik, beendet. Somit wird nach diesem Zeitpunkt die deutsche und die österreichische Donaustrecke zur vollwertigen Wasserstraße.

Die Staustufen als Regulierungsbauwerke sind auch an der österreichischen Donaustrecke Mehrzweckanlagen und dienen sowohl der Wasserkraftnutzung wie den Belangen der internationalen Schifffahrt. Welche Bedeutung der Donau beigemessen wird, geht am besten daraus hervor, daß zusammen mit den hochragenden Alpen der mächtig dahinfließende Strom in der Nationalhymne des Landes angedeutet wird: Land der Berge - Land am Strome.

Die Untersuchung sämtlicher, den Ausbau des Stromes als Energieträger und als Großschifffahrtsstraße betreffender Fragen, ferner die Erarbeitung der Zeitpläne bilden die Aufgabe der Österreichischen Donaukraftwerke AG.

An der österreichischen Donaustrecke sind 13 Staustufen vorgesehen. Von diesen arbeiten bereits 5, nämlich Jochenstein, Aschach, Ottensheim-Wilhennig, Wallsee-Mittenkirchen, Ybbs-Persenbeug, während sich die sechste bei Altenwörth im Bau befindet. Die Gesamtleistung der gegenwärtig in Betrieb stehenden österreichischen Donaukraftwerke erreicht 996 MW mit einer Jahresarbeit von rund 5,8 Milliarden kWh. Im Endausbau werden die Kraftwerke mit einer mittleren Leistung von je 200 MW jährlich 14,5 Milliarden kWh Strom in das österreichische Netz speisen und dadurch wesentlich zur wirtschaftlichen Entwicklung beitragen.

Der Durchbruch der malerischen Gebirgszüge in der Deutschen Bundesrepublik und in Österreich, ferner die Überwindung des letzten Hindernisses der Alpen- und Karpatenausläufer bei der Marchmündung, scheint die Energie des Stromes zu verzehren, so daß sich die Donau auf der gemeinsamen ungarisch-tschechischen Strecke in tausend Arme verzweigt, verlangsamt abfließt und einen Großteil ihrer Geschiebefracht absetzt. Dies verursacht eine Sohlenhebung von 2 cm pro Jahr und dadurch erhebliche Schwierigkeiten für die Schifffahrt und den Hochwasserschutz.

Die Strecke zwischen Bratislava und Gönyü kann eigentlich mit einer Mündung verglichen werden. Durch umfangreiche Regulierungsarbeiten gelang es hier am Ende des letzten Jahrhunderts für die Schifffahrt ein einheitliches Mittelwasserbett von 300 Meter Breite zu schaffen. Die Regulierung des zwischen Leitwerke eingengten Hauptarmes brachte jedoch keine Lösung für die Sohlenhebung noch für das Problem der Schifffahrt bei niedrigen Wasserständen. Die Niedrigwasserregulierung wurde in den ersten Jahrzehnten des XX. Jahrhunderts begonnen mit dem Einbau von Buhnen mit veränderlichem Querschnitt, und obwohl dadurch die Verhältnisse für die Schifffahrt wesentlich verbessert werden konnten, wurde der Sohlenhebung bis heute kein Einhalt geboten. Ein effektiver Hochwasserschutz konnte nur durch die ständige Erweiterung und Erhöhung der Hochwasserdeiche erreicht werden. Die Standfestigkeit der Deiche wurde durch den Einbau von Kiesbermen und Rückstaudeichen in jüngster Zeit bedeutend gesteigert.

Die ständigen Bemühungen, die für das wesentliche Problem doch keine Lösung brachten, führten zum Gedanken, auch diese Strecke mit Hilfe von Staustufen zu regulieren. Die vorherrschenden geologischen Verhältnisse lassen jedoch keine einfache Lösung zu.

Die größten Schwierigkeiten verursachen die mehrere hundert Meter starken Kiesablagerungen und die starke Geschiebeführung.

Nach den Empfehlungen der Internationalen Donaukommission soll unterhalb von Wien die Schifffahrtsrinne mit einer Breite von 150 Meter und einer Tiefe von 3,5 Meter ausgebaut werden. Das gemeinsam von Ungarn und der Tschechoslowakei geplante Staustufenprojekt soll auf der Strecke zwischen Bratislava und Budapest die Probleme der Schifffahrt und Flußregulierung den Empfehlungen der Donaukommission entsprechend lösen. Unterhalb von Bratislava wird das Wasser durch die Staustufe Dunakiliti zu einem kleinen Speicher aufgestaut und über einen 18 Kilometer langen, für  $4\ 000\ \text{m}^3/\text{sek}$  ausgebauten, befahrbaren Triebwasserkanal dem Kraftwerk Gabčíkovo zugeführt. Durch einen 7,6 Kilometer langen Unterwasserkanal gelangt es wieder in das Hauptbett der Donau. Dieses Projekt bildet zusammen mit dem 146 Kilometer weiter liegenden Flußkraftwerk Nagymaros einen hydraulisch und energetisch verbundene, technische und wirtschaftliche Einheit. Durch die beiden Staustufen wird ein 240 Kilometer langer Donauabschnitt beeinflusst.

Neben einer Jahresarbeit von 3,6 Milliarden kWh und der Schaffung von Verhältnissen, die die Belange der Schifffahrt auch in weiterer Zukunft befriedigen, wird das Staustufenprojekt an dem betroffenen Flußabschnitt einen hohen Grad von Hochwasserschutz gewährleisten, der auf andere Weise nicht zu erreichen wäre.

Unterhalb von Budapest sind bei Adony und Fajsz zwei Staustufen vorgesehen, um verbesserte Verhältnisse für die Schifffahrt zu schaffen.

1972 wurde von Jugoslawien und Rumänien das größte Kraftwerk von Mitteleuropa, die Staustufe am Eisernen Tor eingeweiht, und dadurch wurden auf der Kataraktenstrecke die Hindernisse für die Schifffahrt endgültig behoben. Die von Kaiser Trajan begonnene Arbeit wurde in einer modernen Form abgeschlossen. Mit einer mächtigen Jahresarbeit von 11 Milliarden kWh ist dies das größte Donaukraftwerk. Als jugoslawisch-rumänisches Gemeinschaftsprojekt ist die II. Staustufe am Eisernen Tor und in bulgarisch-rumänischer Zusammenarbeit die Staustufe bei Nikopol in Planung.

Der volle Ausbau der Donau als Kraftwasserstraße wird durch weitere zwei Staustufen an der unteren Donau, bei Cernawoda und bei Ismail, abgeschlossen.

Die Donau bietet so manche landschaftliche Werte und wirtschaftliche Gelegenheiten für die ihre Ufer besiedelnden Völker und trug über die Jahrtausende zur Verbreitung der Kultur bei. Ohne entsprechende Vorsorge ist sie jedoch gerade durch die moderne Kultur und Zivilisation gefährdet. Die industriellen und häuslichen Abwässer, die in wachsenden Mengen in den Fluß geleitet werden, bedrohen das aquatische Leben, das biologische Gleichgewicht des Wassers. Diese Veränderungen bringen eine Veränderung der natürlichen Fähigkeit zur Selbstreinigung mit sich. Mit der Entwicklung der chemischen Industrie, der Anwendung von Chemikalien in der Landwirtschaft, gelangen zunehmende Mengen von bioresistenten Stoffen in das Wasser, die bereits in geringer Konzentration große Schwierigkeiten zum Beispiel in der Trinkwasserversorgung bereiten. Den Kampf gegen den Menschen kann die Donau allein nicht führen. Der Mensch muß sich selbst bewältigen, damit der Fluß wieder zur von Johann Strauss besungenen blauen Donau wird. Dieses Bestreben verlangt eine neue, großzügige Zusammenarbeit der Donauländer und wird wirksam von der Weltgesundheitsorganisation unterstützt, mit deren finanziellen Hilfe ein umfangreiches System des Güteschutzes in der Entwicklungsphase steht.

Wie auf dem Gebiet des Hochwasserschutzes die Zusammenarbeit und die schnelle und genaue Information die Möglichkeit erfolgreicher Schutzmaßnahmen gewährleisten, bedarf es auch im Kampf gegen die Wasserverschmutzung einer ähnlichen Gemeinschaftsarbeit. Unauffällig wird das Netz automatischer Fernmeldepegel entlang der Donau ausgebaut. In dieser Arbeit wurde mit dem Ausbau des österreichischen Fernmeldenetzes eine wichtige Etappe abgeschlossen, da von den wichtigeren Pegeln an der Donau laufend Daten in die Linzer und Wiener Zentralen einlaufen. Mit gefälliger Genehmigung des Hydrographischen Zentralbüros richtete Ungarn in Wien eine an dieses Netz angeschlossene Fernschreibstation ein, über welche auf Anruf die wichtig-

sten Daten des österreichischen Fernmeldenetzes erhältlich sind. An der ungarischen Donau wurden bereits drei Pegelstationen mit Telexdat Anlagen ausgerüstet, wodurch jeder der Anrainerstaaten in die Lage versetzt wird, durch Anruf der Fernschreibanlagen in Wien und Budapest in den Besitz der erwünschten Informationen zu gelangen.

Als erster Schritt im Kampf gegen die Wasserverschmutzung richtete Ungarn an zwei Stellen automatische Anlagen zur Überwachung der Wassergüte ein, deren Daten durch Fernschreibanruf für sämtliche Interessenten zugänglich sind.

Seit der ersten Budapester Konferenz über Vorhersagen wird der Ausbau der Donau zur Großschiffahrtsstraße stürmisch vorangetrieben, und ihre Verbindung mit den offenen Meeren rückt in der nächsten Zukunft in greifbare Nähe. Die Energievorräte der Donau werden von den Anrainerstaaten schrittweise ausgenützt, verbunden mit der wesentlichen Verbesserung der Verhältnisse für die Schifffahrt. Das Flußwasser wird in steigendem Maß für landwirtschaftliche und industrielle Zwecke herangezogen, was durch den Bau von Überführungen zwischen Einzugsgebieten intensiviert wird. Hochwasser- und Wassergüteschutz erfordern stetig zunehmende Anstrengungen.

Sowohl die planmäßige Nutzung der Wasserkräfte, die wirtschaftliche Organisation der Schifffahrt, die Vorbereitungen und Maßnahmen des Hochwasserschutzes, als auch die Reinhaltung des Flusses, bzw. die Verhütung oder Verringerung der durch gelegentliche Verschmutzung verursachten Schäden betonen die dringende Notwendigkeit der hydrologischen Vorhersagen und der weiteren, noch intensiveren Zusammenarbeit der Donaustaaten.

Im folgenden Abschnitt der Konferenz werden diesbezüglich hoffentlich wertvolle Vorschläge gemacht, auf deren Grundlage entsprechende Empfehlungen erarbeitet werden können.

TEILNEHMERVERZEICHNIS

ADLER, A.W., Oberbaudir.	Bayer.Landeshafenverwaltung, 8400 Regensburg
AFANASIEV, A.J.	Donaukommission, Budapest VI/Ungarn, Benczur Utza 25 (Sekretariat)
AHAMMER, H., Dipl.-Ing.	Innwerk AG, 8261 Töging/Inn, Werkstrasse 1
ALLESCH, F., Ing.	Österr.Bayer.-Kraftwerke AG, 8265 Simbach/Inn, Münchnerstrasse 48
ANDERL, B., Dipl.-Ing.	Emschergenossenschaft, 4300 Essen 1, Kronprinzenstrasse 24
ANEMOLLER, M., Dipl.-Ing.	Staatl.Amt für Wasser- und Abfallwirtschaft, 4780 Lippstadt, Postfach 581
ANDJELIC, M.	Hydrolog.Unionsinstitut Belgrad, Birtschaninowa 6
ARLT, H., Dipl.-Ing.	Inst.f.Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Berlin, 1000 Berlin 10, Straße des 17. Juni 140
ATTMANNSPACHER, W., Ltd.Reg.Dir.Dr.	Observatorium des Deutschen Wetterdienstes, 8126 Hohenpeißenberg
BAJOVIC, M.	Republici Hidrometeoroloski Zavod, SR Crna Gora, Titograd, Jugoslawien
BARTHA, P., Dipl.-Ing.	Forschungsanstalt für Wasserwirtschaft "VITUKI" H- 1088 Budapest VIII, Rákoczi ut 41
BAUMGARTNER, V., Dipl.-Math.	Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
BECKMANN, J., Dipl.-Ing.	Wasser- und Schifffahrtsamt, Postfach 315, 8400 Regensburg
BLASCHKE, H., Dipl.-Ing.	Amt der Oberösterr.Landesregierung, Hydrographischer Dienst, A-4020 Linz, Kärntnerstrasse 12
BOGOJAVLENSKIJ, J.N.	Sekretariat UNESCO, 7, Place de Fontenoy, F - 75 700 Paris
BONACCI, O.	Subiceva 21, 41 000 Zagreb, Jugoslawien
BRANDT, Th.	Inst.f.Hydraulik und Hydrologie der TH Darmstadt, Petersenstrasse, 6100 Darmstadt
BRINKMANN, W.L.F., Prof.Dr.	Geograph.Inst.d.Universität Frankfurt, Senckenberganlage 36, 6000 Frankfurt/M
BRUNNER, R., Dipl.-Ing.	Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Wörthstrasse 19, 8700 Würzburg
BULATOVIC, St.	Republici Hidrometeoroloski Zavod, SR Crna Gora, Titograd, Jugoslawien
BURSCHKA, W., Dipl.-Ing.	Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Postfach 315, 8400 Regensburg
BURZ, J., Dr.	Hauptverwaltung Rhein-Main-Donau AG, Leopoldstrasse 28, 8000 München 40
CARL, L., Dipl.-Ing.	Talsperrenneubauamt, Postfach 2540, 8500 Nürnberg
CEHAK, K., Univ.Prof.Dr.	Forschungsabt.d.Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hohe Warte 38, A-1190 Wien
DEIGLMAYER, W., Dipl.-Ing.	Wasserwirtschaftsamt München, Praterinsel 2, 8000 München 22
DEISENHOFER, H.E., Dipl.-Met.	Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstr. 24, 8000 München 22
DJORDJEVIC, T., Dipl.-Met.	Hydrometeorologisches Institut Serbien, Gatschwanska 21/VII, Belgrad
DEMENTJEW, N.F.	Moskau, Bolschewistskaja 9-13, UdSSR
DEUTSCH, Dipl.-Ing.	Hafenverwaltung, Linzerstrasse 6, 8400 Regensburg
DRAXLER, A., Dipl.-Ing.	Österr.Donaukraftwerke AG, Kohldorferstrasse 98, A-9010 Klagenfurt

- ERTL, W. Hauptverwaltung Rhein-Main-Donau AG, Leopoldstrasse 28  
8000 München 40
- FLESKES, G., Dr. Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Kumpfmühlerstrasse 6, 8400 Regensburg
- FRANKE, P.-G., Prof.Dr.-Ing. Institut für Hydraulik und Gewässerkunde der TU München, Arcisstr. 21,  
8000 München 2
- FUHRMANN, H., Ing. Bayernwerk AG, Blütenburgstrasse 6, 8000 München 2
- GANZ, G., Bauing. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Bannwaldallee 24,  
7500 Karlsruhe
- GERNERT, Dipl.-Ing. Wasserwirtschaftsamt Krumbach, Abhofach, 8908 Krumbach
- GINZBURG, B. M. Hydrometzentz. UdSSR, Bolschewistskaja Ur 9-13, Moskau D 376
- GLASEL, E., Dipl.-Ing. Hydrographisches Zentralbüro, Marxergasse 2/III, A-1030 Wien
- GODA, L., Dr. Forschungsanstalt für Wasserwirtschaft "VITUKI", Rakoczi ut 41  
H-1088 Budapest VIII
- GRAF, J., Dipl.-Ing. Ennskraftwerke AG, Resthofstrasse 2, A-4400 Steyr
- GRUBER, O., Dipl.-Ing. Bundesstrombauamt, Hetzgasse 2, A-1030 Wien III
- de HAAR, U., Dr. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Kennedyallee 40,  
5300 Bonn-Bad Godesberg
- HACKL, Dipl.-Ing. Wasserwirtschaftsamt, Landshuter Strasse 59, 8400 Regensburg
- HAFNER, K., Dipl.-Ing. Wasserwirtschaftsamt Passau, Dr.-Geiger-Weg 6, 8390 Passau
- HARBOE, R., Prof.Dr. Institut für Hydraulik und Gewässerkunde der TU München, Arcisstr. 21,  
8000 München 2
- HAUCK, E., Dipl.-Ing. Versuchsanstalt für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität  
Karlsruhe (TH), Kaiserstrasse 12, 7500 Karlsruhe
- HERBOTH, W., Dipl.-Ing. Neubauamt Donauausbau, Sedanstrasse 18, 8400 Regensburg
- HERZOG, W. Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Postfach 315, 8400 Regensburg
- HINRICH, H., Dr.-Ing. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Kaiserin-Augusta-Anlage 15-17,  
5400 Koblenz
- HLADNY, J., Dipl.-Ing. Hydrometeorologický Ústř, Nábřeží 4, 151 08 Prag
- HÜHNE, H., Ing. Österr.Bayer.-Kraftwerk AG, Münchnerstrasse 48, 8265 Simbach/Inn
- HOFIUS, K., Dr. IHP-Sekretariat bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde,  
Kaiserin-Augusta-Anlage 15-17, 5400 Koblenz
- HUBER, P., Dipl.-Ing. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Landwirtschaftl.Wasserbau  
Außenstelle der TU Hannover, Dorfstrasse 28, 3201 Ruthe/Sarstedt
- IWANOW, K., Doz.Dr. Institut für Hydrologie und Meteorologie, Bld. Lenin 66, 1113 Sofia,  
Bulgarien
- KELLER, R., Prof.Dr. Lehrstuhl für Geographie und Hydrologie der Universität Freiburg,  
Werderring 4, 7800 Freiburg/Brg.
- KIRNBAUER, R., Dipl.-Ing. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft d. TU Wien,  
Karlsplatz 13, A-1040 Wien
- KNAUF, D., Dipl.-Ing. Institut für Hydraulik und Hydrologie der TH Darmstadt, Petersenstr.  
6100 Darmstadt
- KOBILKA, J., Dipl.-Ing. Österr.-Bayer.-Kraftwerke AG, Münchnerstrasse 48, 8265 Simbach/Inn
- KÖNIG, R., Dipl.-Ing. Wasserwirtschaftsamt, Seligenthaler Str. 12, 8300 Landshut
- KRAIJENHOFF, Prof. Dept.of Hydraulics an Catchment Hydrology Agricultural University  
"De Nieuwlanden", Nieuwe Kanaal II, Wageningen/Niederlande
- KRAUS, Amtsrat Wasserwirtschaftsamt Krumbach, Abhofach, 8908 Krumbach

- KRAUSNEKER, P., Dipl.-Ing. Institut für Wasserwirtschaft, Hochschule für Bodenkultur  
A-1200 Wien, Innstrasse 25/6/11
- KRETSCHMER, O., Dipl.-Ing. Himm elbergerstrasse 34/I/5, A-4020 Linz
- KUNSCH, I. Hydrometeorologický Ustav, Jeseniova 17, 885 32 Bratislava-Koliba
- LABITZKY, W., Dipl.-Ing. Straßen- und Wasserbauamt Pfarrkirchen, Arnstorfer Strasse 11,  
8340 Pfarrkirchen
- LANDES, Th., Direktor Institut für Wasser- und Abfallwirtschaft, Hebelstr. 2, 7500 Karlsruhe
- LIEBSCHER, H.-J., Dr. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Kaiserin-Augusta-Anlage 15-17,  
5400 Koblenz
- MACHENS, U., Dipl.-Ing. Wasser- und Schifffahrtsamt, Neuburger Strasse 12, 8390 Passau
- MANN, E. Am Marktplatz 1, 8553 Ebermannstadt
- MAREK, G., Dipl.-Ing. Amt der Oberösterreich. Landesregierung, Hydrographischer Dienst,  
Kärntnerstrasse 12, A-4020 Linz
- MARTINKA, K., Hydrometeorologický Ustav, Jeseniova 17, 885 32 Bratislava-Koliba
- MEIER, R.C., Dr.Dipl.-Ing. Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München,  
Arcisstrasse 21, 8000 München 2
- MENDEL, H.G., Dipl.-Phys. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Kaiserin-Augusta-Anlage 15-17,  
5400 Koblenz
- MICHAELIS, H., Dipl.-Ing. Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Postfach 315, 8400 Regensburg
- MUNDT, G., Dipl.-Ing. Österr.-Bayer.-Kraftwerke AG, Münchnerstrasse 48, 8265 Simbach/Inn
- NEMEC, I., Prof. Direktor Hydrology and Water Resources Department, WMO, Boite postale 5,  
CH-1211 Genève 20
- NEUMOLLER, M., Prof.Dr. Innwerk AG, Werkstrasse 1, 8261 Töging/Inn
- NINOW, I.P., Prof. Hochschule für Bauingenieurwesen, UL Cerna Woda 24, Sofia-1612,  
Bulgarien
- NOBILIS, F., Dr. Hydrographisches Zentralbüro im BM für Land- und Forstwirtschaft,  
Marxergasse 2, A-1030 Wien
- NORGAUER, O., Dipl.-Ing. Hafenerverwaltung, Linzerstrasse 6, 8400 Regensburg
- OCOKOLIC, M. Amt für Hydrometeorologie, Dienststelle Serbien, Bauwanska BR 21/VI  
Belgrad, Jugoslawien
- OPRICOVIC, S.C. Mathematisches Institut, Knez Mihajlowa 35, Belgrad, Jugoslawien
- PARSCHIN, W. N., Prof. Hidrometzent. UdSSR, Bolschewistskaja 9-13, Moskau
- PENTSCHEW, P., Prof. Lehrstuhl für Klimatologie und Hydrologie an der Universität Sofia,  
3, Benkowski Str., Sofia/Bulgarien
- PERTZSCH, H., Dipl.-Ing. Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Postfach 315, 8400 Regensburg
- PETSCHINOW, D., Doz. Institut für Hydrologie und Meteorologie, Leninstrasse 66, Sofia
- PODANI, M., Dr.-Ing. Rumänisches IHP-Nationalkomitee, Bd. Republicii 34, Bucarest III
- POLJAKOWA, K.N. Hidrometzent. UdSSR, Bolschewistskaja 9-13, Moskau
- PRELLBERG, D., Dipl.-Ing. Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig, Postfach 3329,  
3300 Braunschweig
- PROHASKA, S. Institut J Cerni, Vele Nigrinove 16, Zemun, Jugoslawien
- PSCHORR, R., Dipl.-Ing. Präsident der Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Postfach 315,  
8400 Regensburg
- RAJNOW, S.W., Prof. Hochschule für Bauingenieurwesen, Milinkamak 33b, Sofia/Bulgarien
- ROBINSON, S., Hydr. Lahmeyer International GmbH, Lyoner Strasse 22, 6000 Frankfurt/M 71
- RÜSL, G., Dipl.-Ing. Institut für Wasserbau und -mengenwirtschaft d.TU München, Arcisstr. 21  
8000 München 2

- ROSEMANN, J., Dipl.-Ing. Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
- ROSENBERG, M., Dr. Geographisches Institut der Universität Freiburg, Werderring 4, 7800 Freiburg/Brg.
- ROTTLER, Dipl.-Ing. Wasserwirtschaftsamt Krumbach, Abhofach, 8908 Krumbach
- RUHS, P., Dipl.-Ing. Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
- SAFONOW, A.P. Komitet UdSSR po MGP, per Pawlika Morosowa, Nr. 12, Moskau
- SAPOSCHNIKOW, W.I. Hidrometzent. UdSSR, Bolschewistskaja 9-13, Moskau
- SCHABLEVSKAJA, W. Institut Wodnyek Problem, Akademii Hayk UdSSR, Sadowo-Tschunogradskaja Moskau K-64
- SCHEURMANN, K., Prof.Dr.-Ing. Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
- SCHIMUNEK, K., Dipl.-Ing. Österr. Donaukraftwerke AG, "Hochhaus Gartenbau", Parkring 12, A-1011 Wien I
- SCHILLER, H., Dipl.-Ing. Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
- SCHÖNWÄLDER, W., Dipl.-Ing. Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
- SCHOOFF, M., Dipl.-Ing. Landesanstalt für Wasser- und Abfall Nordrhein-Westfalen, Postf. 5227 4000 Düsseldorf
- SCHTSCHERBAK, A.D. Ukrainisch Hydrometeorolog. Institut, Prospekt Nauky 105, Kiew, UdSSR
- SCHULTHEIß, E., Dipl.-Ing. Amt der Niederösterr. Landesregierung Wien, Herrngasse 11-13, A-1010 Wien
- SCHUPP, J., Dipl.-Ing. Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
- SIDOROWA, L.W. Hydrometeorologisches Institut Tbilissi, Prospekt Plechanowa 150, Tbilissi, UdSSR
- SIEFKE, W., Dipl.-Ing. Neubauamt Donauausbau, Sedanstrasse 18, 8400 Regensburg
- SIMO, E., Dr. Institut für Hydrologie und Hydraulik der Slowakischen Akademie der Wissenschaften, Trnavská 20, 88146 Bratislava, CSSR
- SPIEGEL, R.-P., Dipl.-Ing. Institut für Hydraulik und Gewässerkunde der TU München, Arcisstr. 21, 8000 München 2
- STADEN, M., Ing.grad. Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
- STELCZER, K., Dr. Forschungsanstalt für Wasserwirtschaft "VITUKI", Rákóczi ut, H-1088 Budapest VIII
- STOLZ, A., techn.Amtsrat Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
- STREIL, J., Dipl.-Ing. Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
- STROINSKI, W., Dipl.-Ing. Wasserwirtschaftsamt, Landshuter Strasse 59, 8400 Regensburg
- STUNDL, W., Dipl.-Ing. Magistrat der Stadt Wien, Magistratabteilung 29 - Unterabteilung Schutzwasserbau, Niederhofstrasse 23, A-1120 Wien
- SUNKEL, H.D., Dipl.-Ing. Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Postfach 315, 8400 Regensburg
- TAUBERT, U., Dipl.-Ing. Vereinigte Elektrizitätswerke Westfalen AG, Ostwall 51, 4600 Dortmund
- THIESS, N., Dipl.-Ing. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Hebelstrasse 2, 7500 Karlsruhe
- TIMTSCHENKO, W.M. Forschungsinstitut DWNIGMI, Wladiwostok, UdSSR

TIPPNER, M.	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Kaiserin-Augusta-Anlage 15-17, 5400 Koblenz
TOSIC, V., Dipl.-Ing.	Svetog Save 4 1/2, Belgrad
TRAUTMANN, K.,	Lahnstrasse 67, 5931 Netphan
TRIER, H., Dipl.-Ing.	Wasserwirtschaftsamt, Paradeplatz 13, 807 Ingolstadt
TRNINIC, D.	Republici Hidrometeoroloski Zavod, Ravnice 106/6, 41000 Zagreb
UNBEHAUEN, W., Dr.-Ing.	Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
VAHL, H., Dr.-Ing.	Leichtweiß-Institut für Wasserbau der TU Braunschweig, Postf. 3329, 3300 Braunschweig
VENNEBUSCH, D., Dipl.-Ing.	Wasserwirtschaftsamt, Detterstrasse 20, 8360 Deggendorf
WACKERMANN, R.	Institut für Hydraulik und Hydrologie der TH Darmstadt, Petersenstr., 6100 Darmstadt
WARMERDAM, P.M.M., Dipl.-Ing.	Landwirtschaftliche Hochschule, Abt. Hydraulika, Wageningen/Niederlande
WASILJEV, S.K., Prof.	Hochschule für Bauingenieurwesen, UL Zar Boris I 86, Sofia/Bulgarien
WEGENER, Dipl.-Ing.	Regierung der Oberpfalz, Emmeramsplatz 8, 8400 Regensburg
WEINGARTNER, I., Dipl.-Hydrolog.	Landesanstalt für Wasser- und Abfall, 4000 Düsseldorf
WOERST, R., Dipl.-Ing.	Bundesminister für Verkehr, Kennedyallee, 5300 Bonn-Bad Godesberg

Ehrengäste:

Botschafter G. Schödel	Auswärtiges Amt der Bundesrepublik Deutschland, Bonn Abteilung für Auswärtige Kulturpolitik
Dr. S. Süß	Ministerialdirektor des Bayerischen Staatsministerium des Innern, München
Dipl.-Ing. L. Strobel	Präsident der Bayerischen Landesanstalt für Wasserwirtschaft, München
Dr. K. Pfluger	Bürgermeister der Stadt Regensburg

Mitglieder des Organisationskomitees:

Dr. U. de Haar (Vorsitzender)	Deutsche Forschungsgemeinschaft e.V., Kennedyallee 40-42, 5300 Bonn-Bad Godesberg
Dipl.-Ing. Häckl	Wasserwirtschaftsamt, Landshuter Strasse 59, 8400 Regensburg
Prof. Dr. R. Keller	Lehrstuhl für Geographie und Hydrologie der Universität Freiburg, Werderring 4, 7800 Freiburg/Brg.
Dipl.-Ing. H. Pertzsch	Wasser- und Schifffahrtsdirektion, Postfach 315, 8400 Regensburg
Dipl.-Ing. P. Ruhs	Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
Dipl.-Ing. W. Schönwälder	Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22
Dr.-Ing. W. Unbehauen	Bayer.Landesamt für Wasserwirtschaft, Prinzregentenstrasse 24, 8000 München 22

Mitglieder des Redaktionsausschusses:

Dr. U. de Haar (Vorsitzender)  
Dr. K. Hofius  
Prof. Dr. R. Keller  
Dr.-Ing. W. Unbehauen

Simultan-Dolmetscher auf der Konferenz:

V. Drewin	Gumbinnerstrasse 8, 8000 München 81
Frau von Gersdorff	Eschersheimer Strasse 383, 6000 Frankfurt/M 1
Frau E. Krack	Connollystrasse 6, 8000 München 40
J. Reinicke	Hellwigstrasse 19, 6600 Saarbrücken

Anmerkung:

Die Übersetzungen einzelner Beiträge und Generalberichte sowie die den Generalberichten zugrundeliegenden Länderberichte können Interessenten zur Verfügung gestellt werden.

## Bezug:

IHP-Sekretariat bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde  
Dr. K. Hofius  
Kaiserin-Augusta-Anlage 15-17  
5400 Koblenz