BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ – HYDROLOGIE

NR. 24

Herausgegeben von der Schweizerischen Geotechnischen Kommission
und der Hydrologischen Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft

DIE RHEINWASSERSTRASSE

Technische und wirtschaftliche Aspekte
Hydrologische Aspekte
Abflussprognosen

Vorträge, gehalten an der Fachsitzung der Hydrologischen Kommission der
SNG vom 19. Oktober 1978 in Rheinfelden

Kommissionsverlag: Geographischer Verlag Kümmerly + Frey, Bern 1978
Druck: Helioprint AG, Zürich

Vorwort

Die Herbsttagung 1977 der Hydrologischen Kommission fand in Rheinfelden statt. Dieses malerische Städtchen besitzt bekanntlich den obersten Rheinhafen, der von Rotterdam aus angesteuert werden kann. Es ist somit Endpunkt einer alten und bedeutenden Wasserstrasse. Dieser war denn auch die Herbsttagung gewidmet, und zwar durch zwei Vorträge, welche die hydrologischen, technischen und wirtschaftlichen Aspekte der Wasserstrasse beleuchten. In einem dritten Vortrag wurden die für den Rheinabfluss in Rheinfelden laufend herausgegebenen Prognosen vorgestellt; sie dienen ja nicht zuletzt der Rheinschiffahrt.

Im vorliegenden Heft werden die drei Vorträge in leicht gekürzter Form wiedergegeben. Dabei handelt es sich um einen Versuch, die an der Herbsttagung gebotene Information einem weiteren Kreise zugänglich zu machen.

Zürich, April 1978

Für die Hydrologische Kommission
Der Präsident:
Prof. Dr. D. Vischer

Inhalt

		Seite
Wyss F.	Die Rheinwasserstrasse. Technische, finanzielle und wirtschaftliche Aspekte aus schweizerischer Sicht	7
Emmenegger Ch.	La voir navigable du Rhin, aspects hydrologiques	16
Vischer D.	Abflussprognosen für den Rhein bei Rheinfelden	35

Die Rheinwasserstrasse

Technische, finanzielle und wirtschaftliche Aspekte aus schweizerischer Sicht

F. Wyss

Vorbemerkung

Die Schweiz ist eines der wenigen Länder Westeuropas ohne Meeresküste. Sie liegt auch fern von den Rohstoffbasen. Die Rohstoffarmut unseres stark industrialisierten und exportorientierten Landes zwingt zu hohen Importmengen pro Kopf der Bevölkerung. Diese Importe müssen über weite Distanzen ins Land transportiert werden. Es ist daher naheliegend, dass versucht werden muss, die Transportkosten dieser grossen Importmengen möglichst tief zu halten. Dadurch können die Preise der industriellen Produktion gesenkt und die Exportsituation auf den Weltmärkten kann verbessert werden. Es ist eine Binsenwahrheit, dass Binnenwasserstrassen in hohem Masse dazu beitragen, die Transportkosten für Güter tief zu halten. Für die Schweiz bestand daher seit jeher ein wohlbegründetes Interesse, die Meeresküsten durch Wassertransporte der Importgüter kostenmässig näher an die Landesgrenzen und dadurch auch näher zu den Produktionsstätten heranzuziehen. Die Rheinwasserstrasse als Hauptmagistrale bietet hiezu beste Voraussetzungen und stand deshalb zwangsläufig stets im Vordergrund. So ist es nicht verwunderlich, dass schon sehr früh, d.h. praktisch seit Beginn des 20. Jahrhunderts, das Interesse der Schweiz am Ausbau dieses Transportweges wach wurde. Dieses Interesse führte hier denn auch zu bedeutenden finanziellen Beteiligungen der Schweiz bei Regulierungsarbeiten. Dagegen blieben weitere Anschlussmöglichkeiten wie der direkte Anschluss via Hochrhône an die südwärts orientierte Rhônewasserstrasse mit dem Hafen Marseille, aber auch die Verbindung der Adria mit dem Langensee bis heute Wunschtraum vieler Interessenten.

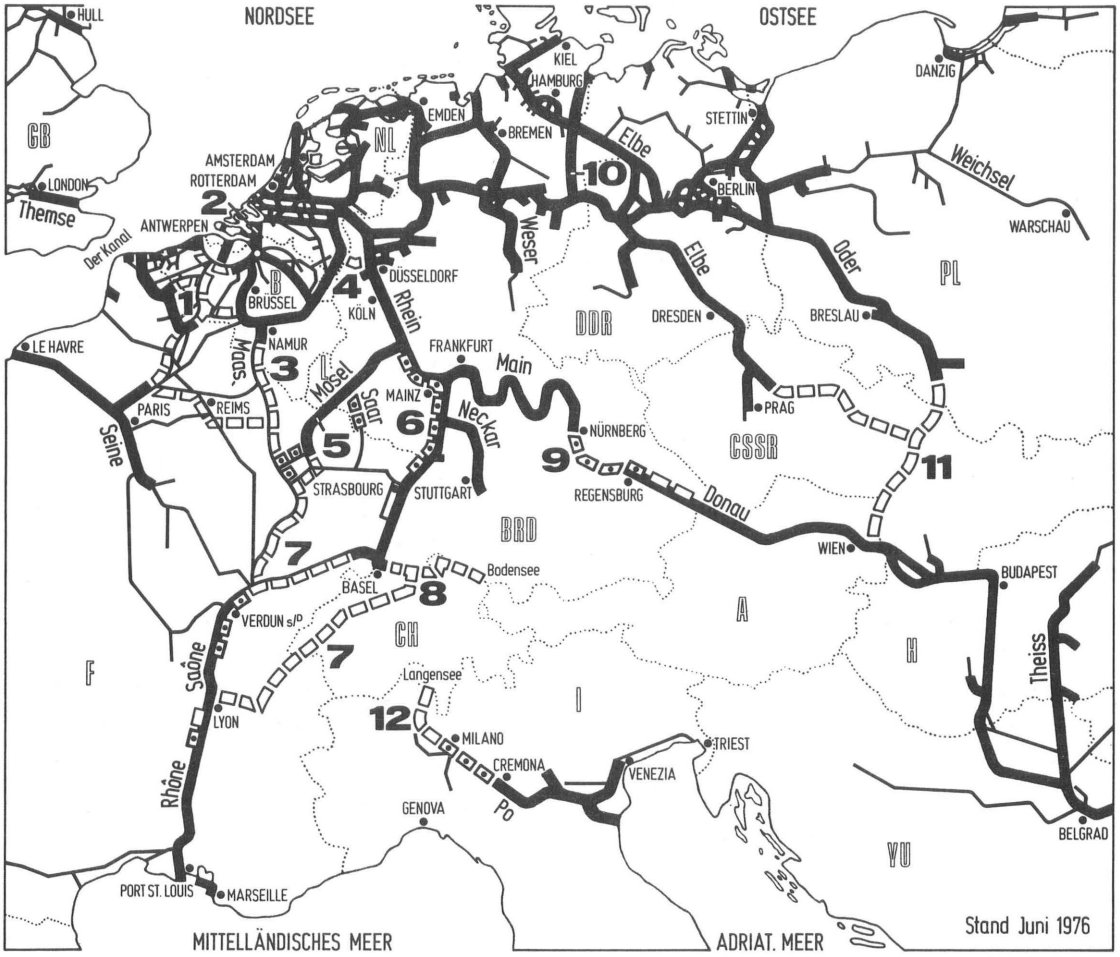
1. Die technischen Aspekte

a) Der Rhein wird bekanntlich in bestimmte Strecken eingeteilt (siehe auch Abb. 2):

- Der Alpenrhein von den Quellen bis zum Bodensee;
- Der Seerhein als Verbindung zwischen dem Obersee und dem Untersee;
- Der Hochrhein zwischen Stein am Rhein und Basel;
- Der Oberrhein zwischen Basel und Bingen;
- Der Mittelrhein zwischen Bingen und Köln;
- Der Niederrhein zwischen Köln und Pannerden (bei der Verzweigung des Rheins in Niederrhein und Waal) und
- das Mündungsdelta mit den niederländischen Stromarmen bis in die Nordsee.

Der Ausbau der heute ab Rheinfelden mit Grossgüterschiffen befahrbaren, 850 km langen Rheinwasserstrasse geht weit ins 19. Jahrhundert zurück. Schon sehr früh wurden grundlegende technische Ausbaudaten festgelegt, die auf einem gleichwertigen Wasserstand des Rheins basieren. Seit dem Jahr 1932 entspricht dieser gleichwertige Wasserstand (gl.W.) einer Niederwasserführung, die im Durchschnitt einer langen Periode an 20 eisfreien Tagen nicht überschritten wird.

Die Fahrrinnentiefen (Abb. 3) bei gleichwertigem Wasserstand wurden wie folgt festgelegt:



Legende: Bestehend — im Bau — Projekt

Bestehende Wasserstrassen der Klassen I und II

Bestehende Wasserstrassen der Klassen III bis V

CEMT-Wasserstrassenprojekte von europäischem Interesse:

1 Verbindung Dünkirchen-Schelde
2 Verbindung Schelde-Rhein Ausbau 1975 beendet
3 Ausbau der Maas
4 Verbindung Maas-Rhein [Westlandkanal]
5 Ausbau der Mosel Ausbau 1964 beendet
6 Ausbau St. Goar-Lauterbourg-Strasbourg
7 Verbindung Rhône-Rhein
8 Ausbau des Hochrheins
9 Verbindung Rhein-Main-Donau
10 Elbe-Seitenkanal Ausbau 1976 beendet
11 Verbindung Oder-Donau
12 Verbindung Adria-Langensee

Technische Daten der von der europäischen Verkehrsminister-Konferenz [CEMT] im Jahre 1954 festgelegten Wasserstrassen-Klasseneinteilung

Klasse	Schiffstyp	Massgebende Schiffsabmessungen für den Ausbau der Wasserstrassen				Charakt. Angabe der Tragfähigkeit
		Länge	Breite	Normale Abladetiefe	Höhe der festen Teile über Wasserspiegel bei Leertiefgang	
	Allgemeine Bezeichnung	m	m	m	m	t
I	Penische	38.50	5.00	2.20	3.55	300
II	Kempenaar	50.00	6.60	2.50	4.20	600
III	Dortmund-Ems Kanal-Kahn	67.00	8.20	2.50	3.95	1000
IV	Rhein-Herne Kanal-Kahn	80.00	9.50	2.50	4.40	1350
V	Grösste Rheinkähne	95.00	11.50	2.70	6.70	2000

Abb. 1 Die europäischen Wasserstrassen

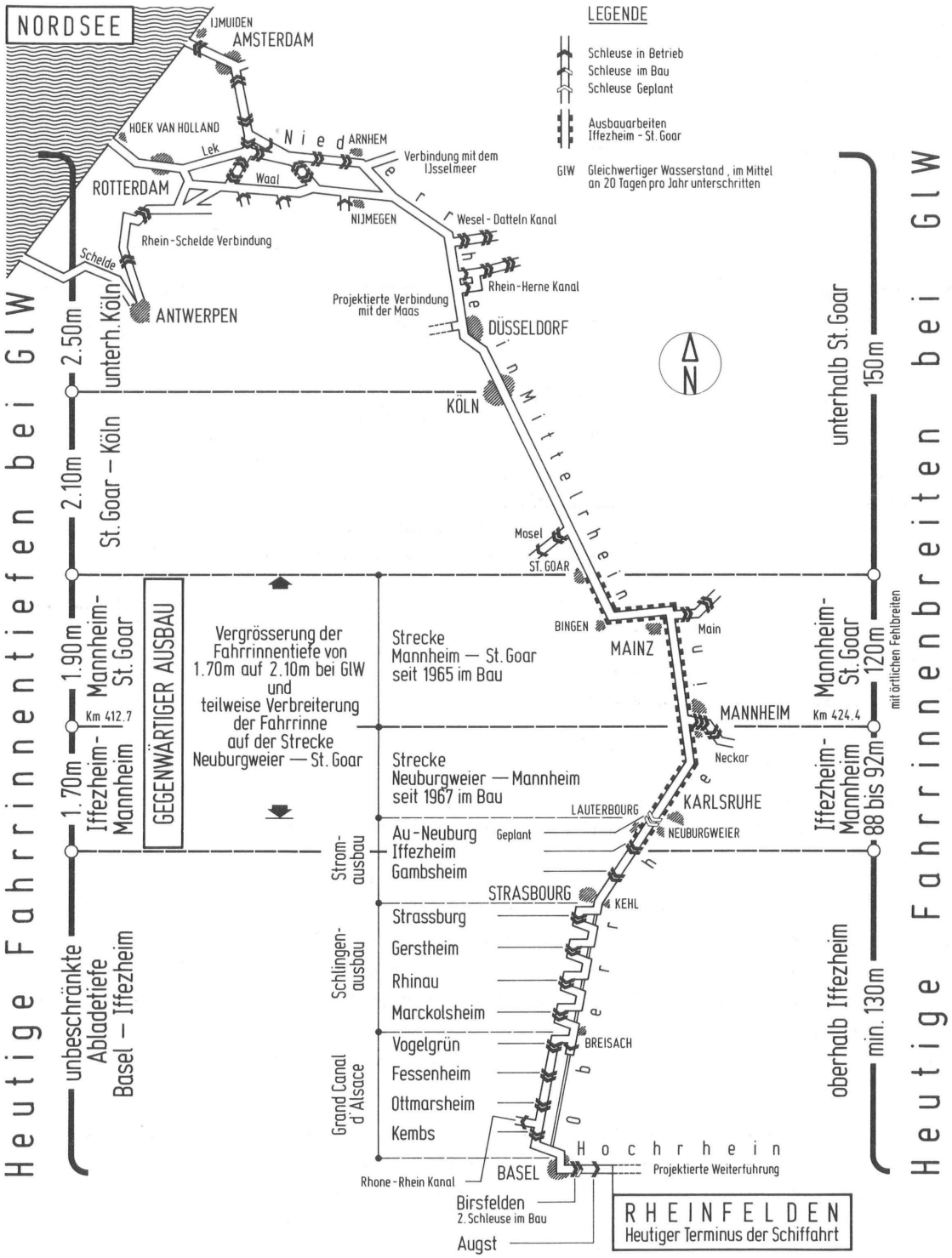


Abb. 2 Gegenwärtiger und zukünftiger Ausbau der Wasserstrasse Rheinfelden - Nordsee

- unterhalb Köln: 2,50 m
- von Köln bis St. Goar: 2,10 m
- oberhalb von St. Goar: 1,70 m

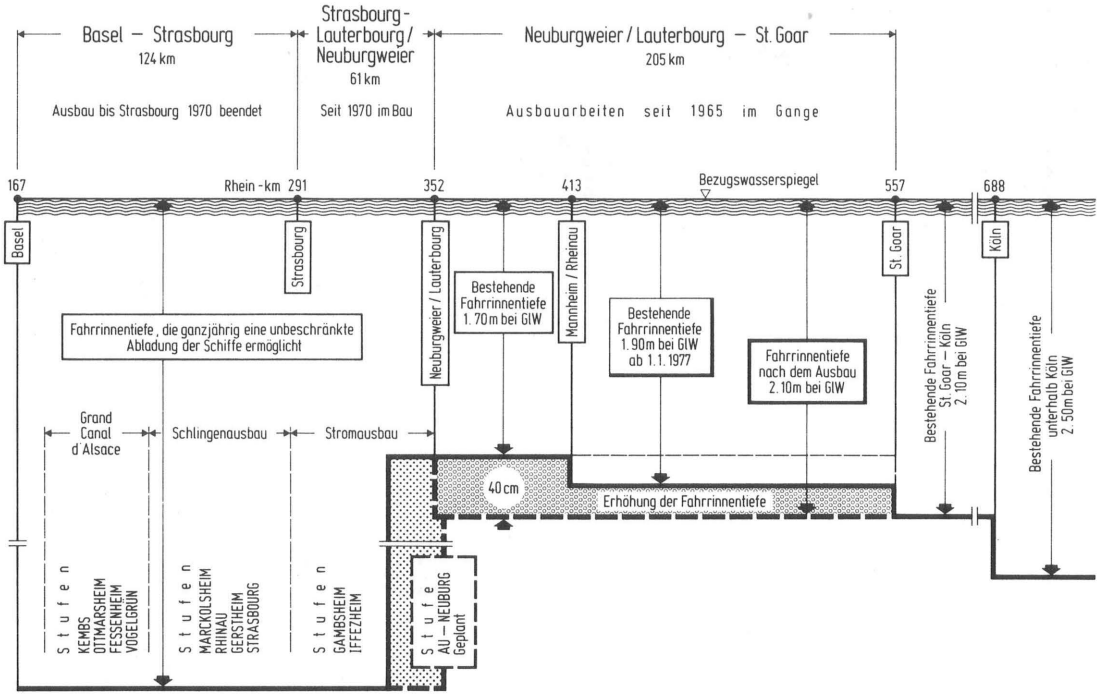


Abb. 3 Fahrrinnentiefen der Rheinwasserstrasse

Als Regelbreiten der Fahrrinnen wurden zwischen Basel und St. Goar Masse zwischen 80 und 120 m und unterhalb St. Goar eine Fahrwegbreite von 150 m bei gleichwertigem Wasserstand angestrebt.

Die für die Schweiz bedeutsamsten Regulierungsarbeiten im Strom wurden auf dem Abschnitt zwischen Strassburg und Istein im Jahr 1930 begonnen. Die Schweiz hatte sich verpflichtet, an die Ausbaukosten einen Beitrag von 60 % zu leisten, Deutschland übernahm 40 %. Bereits im Jahr 1935 konnte festgestellt werden, dass die Fahrwasserrinne auf der gesamten Regulierungsstrecke weitgehend die geplante Tiefe und Lage eingenommen hatte. Damit war der ganzjährige Anschluss der Basler Rheinhäfen an die Rheinwasserstrasse bereits sichergestellt. Durch den zweiten Weltkrieg wurden die Arbeiten unterbrochen, nach dem Krieg wieder aufgenommen und 1956 beendet.

Seit dem zweiten Weltkrieg sind neben den Regulierungsarbeiten zwischen Strassburg und Istein weitere entscheidende Ausbauarbeiten zur Verbesserung der Schiffahrtsverhältnisse vorgenommen worden und zum Teil noch im Gange. Dabei kann von 2 Hauptabschnitten gesprochen werden. Der Trennstrich wird zweckmässigerweise bei der deutsch-französischen Grenze bei Neuburgweier/Lauterburg vorgenommen, rd. 70 km unterhalb Strassburg.

Oberhalb dieser Grenze wird der Ausbau zur Kraftnutzung und Schiffahrt durchgeführt mit der Errichtung von Staustufen und zwar

- als Rheinseitenkanal zwischen Kembs und Breisach mit 4 Staustufen;

- als Schlingenausbau zwischen Breisach und Strassburg mit ebenfalls 4 Staustufen und
- als Stromausbau unterhalb Strassburg mit 3 Staustufen.

Nachdem die Staustufe Kembs im Jahr 1932 in Betrieb genommen wurde, erfolgte der Ausbau des Rheinseitenkanals, des sog. Grand Canal d'Alsace in der Zeit von 1947 bis 1959. Der Schlingenausbau zwischen Breisach und Strassburg wurde deutscherseits als Massnahme gegen die Folgen der Sohlenerosion dem Kanalausbau vorgezogen. Diese Lösung bildete zusammen mit der Rückgliederung des Saarlandes in die Bundesrepublik Deutschland und dem Ausbau der Mosel zur Grossschiffahrtsstrasse Gegenstand des Verständigungswerkes zwischen Deutschland und Frankreich.

Auch der Stromausbau mit 3 Stufen zwischen Strassburg und der deutsch-französischen Grenze bei Lauterburg/Neuburgweier basiert auf der Verständigung zwischen den beiden Uferstaaten. Die Weiterführung des Stufenausbaues erwies sich wegen dem Fehlen einer praktikablen Massnahme gegen die Sohlenerosion und deren Folgen als unumgänglich. Ferner sollen Hochwasserschutzmassnahmen im Gesamtkonzept berücksichtigt werden. Der Ausbau wurde mit der Errichtung der Stufe Gambsheim in der Zeit von 1970 bis 1974 eingeleitet und mit dem Bau der Stufe Iffezheim in den Jahren 1972 bis 1977 fortgeführt. Der Baubeginn der dritten Stufe bei Au/Neuburg bildet zur Zeit Gegenstand von Besprechungen zwischen den beiden Uferstaaten.

Die Schweiz beteiligt sich am Ausbau zwischen Strassburg und Lauterburg mit einem finanziellen Beitrag von 33 Mio Fr.

Im Jahr 1975 wurden durch die deutsche Wasserstrassenverwaltung Naturversuche im Rhein unterhalb der Stufe Gambsheim durchgeführt. Sie haben zum Ziel, abzuklären, ob die dauernde Geschiebezugabe in das Strombett eine wirksame und tragbare Massnahme darstellt, die Sohlenerosion in den Griff zu bekommen. Diese Versuche werden ab Herbst 1977 bis 1980 unterhalb der Stufe Iffezheim weitergeführt, da die Gambsheimer Versuche wegen der kurzen Dauer noch keine Schlussfolgerungen ermöglichten.

Nach Fertigstellung der dritten Stufe Au/Neuburg anfangs der 80er Jahre wird der Schiffahrt ab dieser Stufe ein optimaler Schiffahrtsweg bis Basel zur Verfügung stehen. Bereits heute steht die Schiffahrt stromaufwärts der Stufe Iffezheim im Genuss grosszügiger Schleusenabmessungen, geringer Wassergeschwindigkeiten und unbeschränkter Ablademöglichkeiten der Rheinschiffe. Die grosse Fahrwegbreite schafft ideale und äusserst sichere Fahrtbedingungen. Der Nutzen für die Rheinschiffahrt durch diese technische Meisterleistung ist unverkennbar und wird noch erhöht durch die permanente Stromerzeugung in den Kraftwerkszentralen.

b) Der starke Verkehrsanstieg auf dem Rhein seit den 50er Jahren brachte die Forderung der Schiffahrt und der verladenden Wirtschaft, den Rhein auf dem Abschnitt zwischen Neuburgweier und St. Goar zu vertiefen. Die Engstellen, namentlich auf der Gebirgsstrecke zwischen Bingen und St. Goar, verursachten eine grosse Unfallhäufigkeit und dadurch schwere wirtschaftliche Verluste.

Der grössere Teil der Rheinschiffahrt hat bei voller Abladung eine Tauchtiefe von 2,50 m. Bei 2,10 m Fahrrinnentiefe bei gl. W. können diese Schiffe an 260 Tagen voll beladen werden. Bei 1,70 m sind es aber nur 178 Tage. Nach gründlichen hydraulischen Voruntersuchungen, auch im Modell, wurde im Jahre 1974 mit dem Ausbau begonnen. Entsprechend den Erfordernissen einer modernen Binnenschiffahrt einschliesslich der Schubschiffahrt werden dabei folgende Hauptziele verfolgt:

- Vertiefung der Fahrrinne zwischen Neuburgweier/Lauterburg und St. Goar um 40 cm auf 2,10 m bei gleichwertigem Wasserstand sowie die allgemeine Verbesserung der Schiffahrtsverhältnisse. Dabei wird in der Gebirgsstrecke eine durchgehend 120 m breite Fahrrinne angestrebt. Die Fahrrinnentiefen werden damit denjenigen auf der Strecke zwischen Köln und St. Goar gleichgestellt.
- Auf dem Abschnitt zwischen St. Goar und der niederländischen Grenze sollen Engstellen beseitigt werden und weitere bauliche Massnahmen zur Sicherung der Regulierungsbauwerke wie auch zur Verbesserung der Schiffahrtsverhältnisse ausgeführt werden.

Die vorgenannten Arbeiten sind noch im Gange und werden mindestens bis 1980 dauern. Die Schweiz beteiligt sich mit einem finanziellen Beitrag von 33 Mio Fr. an den Ausbauarbeiten zwischen St. Goar und Neuburgweier. Als Zwischenziel konnte am 1. Januar 1977 zwischen Mannheim und St. Goar eine Fahrrinnentiefe von 1,90 m bei gleichwertigem Wasserstand freigegeben werden samt einer Fahrrinnenbreite von fast durchwegs 120 m. Das gefährliche Bingerloch mit einer Fahrrinnenbreite von nur 30 m gehört der Geschichte an. Damit ist der schwierigste und gefährlichste Engpass im Rhein für immer beseitigt, was auch durch den überaus starken Rückgang der Schiffsunfälle an dieser Stelle belegt wird. Die grosszügigen Ausbauarbeiten oberhalb St. Goar haben auch die Voraussetzungen geschaffen zur Einführung der Nachtschiffahrt auch auf der Gebirgsstrecke.

Als ungelöstes technisches Flussbauproblem verbleibt die Erosionsfrage auf der Tagesordnung. Die erwähnten Naturversuche mit dem Ziel einer dauernden Geschiebezugabe, aber auch andere in Prüfung stehende Vorschläge sollen helfen, eine praktikable Lösung zu finden. Jedermann ist sich bewusst, dass die Aufgabe schwierig und jede Lösung kostspielig sein wird.

Auch auf dem niederländischen Abschnitt der Rheinwasserstrasse stehen technische Ausbauprobleme zur Diskussion, so namentlich die Verbesserung der Fahrwegverhältnisse bei Nijmegen. Aber auch die Vergrösserung der Fahrwassertiefen von 2,50 m auf 2,80 m bis 2,90 m bei gleichwertigem Wasserstand zwischen Duisburg und Rotterdam steht zur Diskussion. Wie jeder Verkehrsweg, muss auch die Rheinwasserstrasse den wechselnden Erfordernissen angepasst werden. Hohes technisches Können, aber auch grosse Geldmittel sind erforderlich, um die gestellten Aufgaben zu meistern.

Erläuterungen über technische Aspekte der Rheinwasserstrasse erfordern auch einen kurzen Hinweis über die Rheinhäfen beider Basel. Die baselstädtischen Hafenanlagen wurden nach und nach erstellt, zuerst der Hafen St. Johann am linken Ufer in den Jahren 1906 bis 1911, und 1935 erweitert. Das am rechten Ufer befindliche Hafenbecken I wurde in der Zeit von 1919 bis 1926, das daneben liegende Hafenbecken II zwischen 1936 und 1942 und die ebenfalls rechtsufrigen Anlagen am Klybeckquai zwischen 1924 und 1926 erstellt. Die Hafenanlagen im Kanton Basel-Landschaft umfassen den zwischen 1937 und 1940 erbauten Auhafen und den Birsfelderhafen.

Ferner befindet sich auf aargauischem Kantonsgebiet in Kaiseraugst eine Umschlagsanlage für Getreide.

2. Finanzielle Aspekte

Das Interesse der Schweiz an einer gut funktionierenden Rheinwasserstrasse ist evident (Abb. 4). Bereits vor dem zweiten Weltkrieg nahm der Bergverkehr der Basler Rheinhäfen eine starke Stellung im schweizerischen Importverkehr ein. Nachdem die erste Schiffsladung von 300 t Gaskoks am 2. Juni 1904 in Basel gelöscht worden war, übertraf der Bergverkehr erstmals im Jahr 1930 die Millionengrenze.

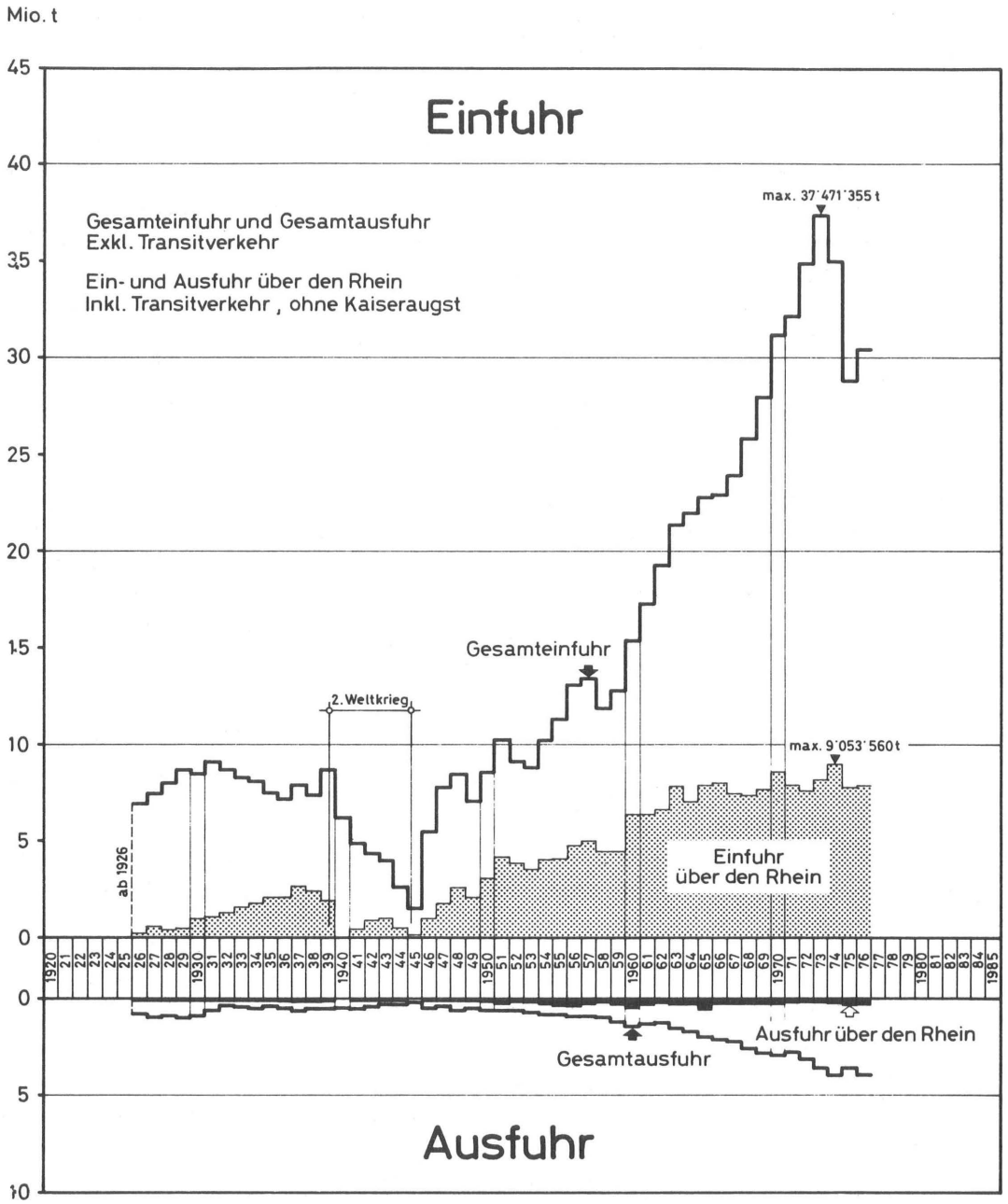


Abb. 4 Anteil der Rheinschiffahrt an der schweizerischen Gütereinfuhr und Güterausfuhr 1926 - 1985 (Quelle: Rheinhafenverkehr beider Basel)

Im Jahr 1937 wurden bereits 2,7 Mio Tonnen in den Basler Rheinhäfen umgeschlagen. Diese Menge entsprach rund 34 % des gesamtschweizerischen Importes von 8,0 Mio Tonnen. Nach dem zweiten Weltkrieg war die Entwicklung sowohl des schweizerischen Gesamtimportes als auch des Rheinimportes Ausdruck einer wirtschaftlich ausserordentlichen Entwicklung. Im Jahre 1960 wurden bereits 6,5 Mio Tonnen und im Jahr 1970 rund 8,6 Mio Tonnen registriert. Das bisherige Maximum des Rheinimportes wurde im

Jahr 1974 mit rund 9 Mio Tonnen erreicht und entsprach 25,8 % der schweizerischen Gesamteinfuhr von rund 35 Mio Tonnen. Diese wenigen Zahlen verdeutlichen das Interesse, das die Schweiz an der Rheinwasserstrasse haben muss.

Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass der Ausbau der Rheinwasserstrasse zur Sicherstellung unserer Zufuhren seit jeher ein erstaunliches Mass an Aufgeschlossenheit und Bereitschaft der Behörden und des Schweizervolkes gefunden hat, für diesen Ausbau finanzielle Mittel bereitzustellen. Es darf deshalb mit Genugtuung vermerkt werden, dass der Bund bis Ende 1976 insgesamt einen Betrag von rund 127 Mio Franken zur Verfügung gestellt hat. Als namhafte bereits geleistete Beträge sind zu nennen: rund 9,6 Mio Fr. als Beitrag an die Erstellungskosten der Hafenanlagen von Basel-Stadt und rund 1,2 Mio Fr. an diejenigen von Basel-Landschaft. Der Beitrag des Bundes an die Kosten der Rheinregulierung Strassburg/Kehl-Istein betrug rund 40,5 Mio Fr. Der Erfolg dieser Regulierungsarbeiten, d.h. der ganzjährige Anschluss der Basler Rheinhäfen an die Rheinwasserstrasse hat den Häfen die Bezeichnung "Goldenes Tor der Schweiz" gebracht.

An die noch laufenden Regulierungsarbeiten zwischen St. Goar und Neuburgweier/Lauterburg hat der Bund, wie bereits erwähnt, seinen Beitrag an die Bundesrepublik Deutschland von 33 Mio Fr. bereits geleistet. Einen gleich hohen Beitrag erhält auch Frankreich. Beide Darlehen werden in einen Beitrag à fonds perdu umgewandelt, wenn das anvisierte Regulierungsziel, d.h. eine Fahrrinnentiefe von mindestens 2,10 m bei gleichwertigem Wasserstand, erreicht sein wird. Die beiden Darlehensbeträge wurden mit Bundesbeschlüssen und dazugehörigen Botschaften des Bundesrates den eidgenössischen Räten unterbreitet. Beide Anträge fanden einstimmige Annahmen. Damit bekundeten die Volks- und Ständevertreter einmal mehr ihr Verständnis für die Bedeutung der Rheinwasserstrasse für die Schweiz.

In einem weiteren Bundesbeschluss ist auch die finanzielle Beteiligung der Eidgenossenschaft an der Erstellung der zweiten Schleuse Birsfelden geregelt. Der Bund hat sich verpflichtet, an die Erstellungskosten einen Beitrag von 60 % zu leisten, aber höchstens 17,16 Mio Fr. Der Bund wird auch an die Mehrkosten für Betrieb, Unterhalt und Erneuerung der erweiterten Schiffahrtsanlagen beitragen.

Nebst dem Bund haben auch die Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft bis Ende 1976 insgesamt rund 87 Mio Franken investiert. Die bedeutenden Investitionen der Privatwirtschaft in die Hafenanlagen beider Basel wie Lagerhäuser, Umschlagseinrichtungen, Tanks usw. betragen rund 494 Mio Fr. und für die Anschaffung der Rheinflotte wurden rund 387 Mio Fr. bereitgestellt. Die gesamten Investitionen in das Unternehmen "Rheinschiffahrt" betragen somit bis Ende 1976 1,095 Mia Fr., woran der Bund und die Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft mit 214 Mio Fr. oder 20 % und die Privatwirtschaft mit rund 881 Mio Fr. oder 80 % beteiligt sind. Das sind ohne Zweifel bedeutende Leistungen und unterstreichen die Bedeutung von Rheinwasserstrasse und Rheinschiffahrt für unser Land.

3. Wirtschaftliche Aspekte

Nach diesen technischen und finanziellen Darlegungen stellt sich zwangsläufig die Frage, welcher Stellenwert der Rheinschiffahrt im Rahmen der wirtschaftlichen Tätigkeit der Schweiz zugewiesen werden kann. Der Beantwortung dieser Frage müsste ein Sonderreferat mit entsprechendem Zeitbedarf reserviert werden; im Rahmen meines Vortrages kann lediglich eine summarische Zusammenfassung gegeben werden.

Der Schiffstransport ist gegenüber dem Transport auf Schiene und Strasse von der Kostenseite im Vorteil, weil ein grosses Transportgefäss mit wenig Leuten und bei geringem Widerstand im Wasser fortbewegt werden kann. Es dürfte allgemein bekannt sein, dass der Energieverbrauch für die Bewegung einer Tonne auf der Strasse 3-3,5 PS, auf der Schiene 2,5 PS und auf dem Wasser etwa 1/2 PS benötigt. Die Rheinschiffahrtsstrasse hat wegen dem Bestehen der Mannheimer Rheinschiffahrtsakte den zusätzlichen Vorteil, dass keine Schiffahrtsabgaben, d.h. Wegekosten, entrichtet werden müssen. Deshalb fällt der Vergleich des Transportes von Rotterdam nach Basel gegenüber Bahn und Strasse zum Vorteil des Schiffstransportes aus. Es ist deshalb eine Tatsache, dass die schweizerische Volkswirtschaft durch den Import von rund 8 - 9 Mio Tonnen pro Jahr über den Wasserweg nach den Basler Rheinhäfen einen grossen Nutzen zieht, der in der Grössenordnung von etwa 100 Mio Fr. pro Jahr liegen dürfte. Der starke Frachtenzerfall in den letzten Jahren trägt dazu bei, dass die Ertragsbilanz für die verladende Wirtschaft noch günstiger ausfällt. Dies sollte natürlich nicht so weit gehen, dass die Reedereien, d.h. die Unternehmen, welche die Transporte ausführen, in die roten Zahlen geraten.

Zur Zeit werden bei den europäischen Gemeinschaften in Brüssel Mittel und Wege gesucht, um durch eine Stillegung von Schiffen in Zeiten des Ueberangebotes an Schiffsraum diesem ruinösen Frachtenzerfall ein Ende zu bereiten.

Abschliessend und zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der technische Ausbau der Rheinwasserstrasse weiter gehen muss, um den ständig steigenden Anforderungen genügen zu können. Dieser Ausbau erfordert ohne Zweifel grosse finanzielle Mittel, deren Bereitstellung bekanntlich überall Sorge bereitet. Der wirtschaftliche Nutzen der Rheinwasserstrasse für unser Land ist bedeutend und stärkt unsere Lage im Konkurrenzkampf auf den Weltmärkten. Deshalb hat das Losungswort nach wie vor seine volle Bedeutung auch für unser Land, das lautet: "Navigare necesse est".

Adresse des Verfassers:

Ing. F. Wyss
Eidg. Amt für Wasserwirtschaft
Postfach 2743
3001 Bern

La voie navigable du Rhin, aspects hydrologiques

Ch. Emmenegger

Introduction

L'importance du Rhin pour les besoins socio-économiques des pays riverains est attestée par les multiples études qui ont été consacrées à ce fleuve, par les nombreuses conventions internationales bi- ou multilatérales ayant trait aux divers modes d'utilisation de ses eaux ou à leur protection, ainsi que par le nombre des organisations ou commissions internationales chargées de questions spécialisées en rapport avec son hydrologie ou ses problèmes d'économie hydraulique.

Le présent exposé vise à donner un aperçu très général des caractéristiques du bassin versant du Rhin, du régime hydrologique du Rhin, de quelques interventions techniques majeures dans ce régime et des aspects de ce régime intéressant particulièrement la navigation rhénane à destination de la Suisse.

1. Quelques données de base sur le bassin versant du Rhin

La surface du bassin versant du Rhin (Fig. 1) est de 185'000 km2, dont 36'000 km2 en chiffres ronds sont situés à l'amont de Bâle. Le Rhin draine les eaux d'environ 68 % du territoire suisse.

Selon la terminologie de la Commission internationale de l'hydrologie du Bassin du Rhin, le cours du Rhin, long de 1'320 km, est divisé en

Rhin alpin	(confluence Rhin antérieur/Rhin postérieur - lac de Constance)
Haut-Rhin	(lac de Constance - Bâle)
Rhin supérieur	(Bâle - Bingen)
Rhin moyen	(Bingen - Cologne)
Rhin inférieur	(Cologne - Lobith)
Delta	(aval de Lobith - mer du Nord)

Le kilométrage officiel du Rhin commence au pont de Constance (point kilométrique zéro: P.K.O.).

Le profil en long du Rhin (Fig. 2) fait apparaître les différences de pente importantes entre le Rhin alpin et les secteurs situés à l'aval. Il met cependant aussi en évidence le fait que, plusieurs fois le long du cours du Rhin, on retrouve la notion classique de pente d'un fleuve (pente raide, puis aplatissement et transition à l'horizontale). En effet des traits morphologiques tels que le lac de Constance, le massif schisteux rhénan ou la présence de barres rocheuses dans les plaines alluviales limitent à chaque fois vers l'amont, du moins momentanément, l'érosion causée par la recherche du profil d'équilibre.

Une caractéristique importante pour le régime du Rhin à Bâle et vers l'aval est la présence des lacs naturels périalpins, dont la plupart (sauf ceux de Constance et Walenstadt) sont régularisés. La surface totale des 16 plus grands lacs correspond à 1'219 km2 (3,34 % du bassin versant à Bâle), dont 542 km2 pour le lac de Constance.

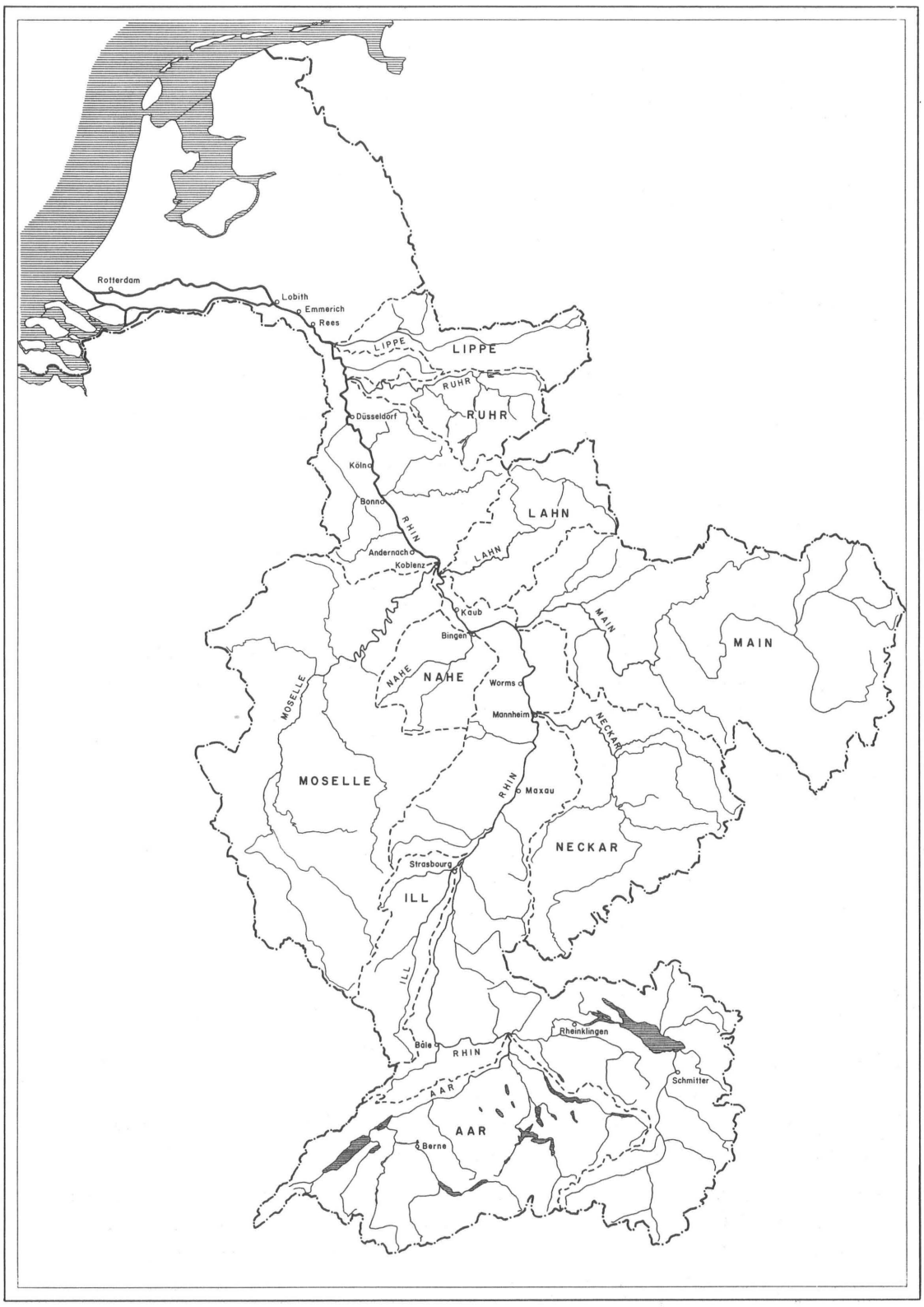


Fig. 1 Bassin versant du Rhin

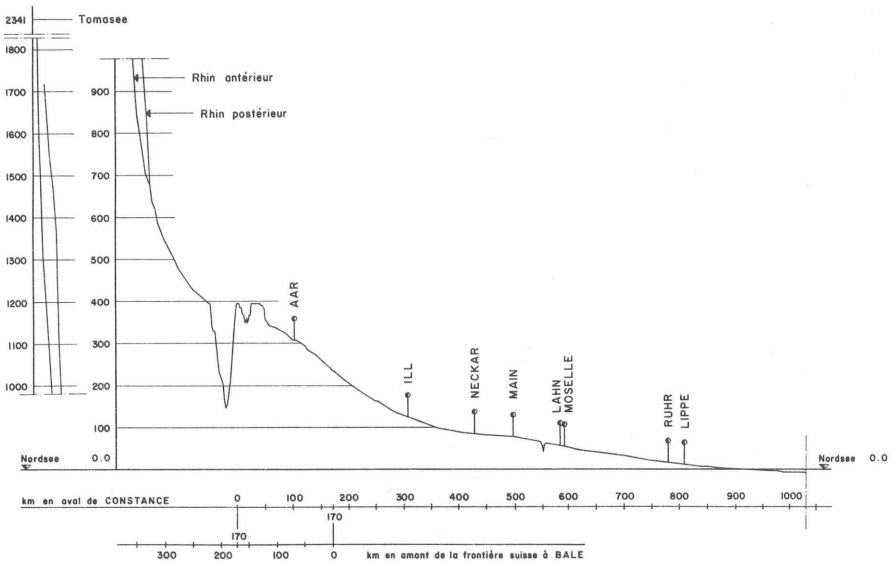


Fig. 2 Profil en long du Rhin (cote du fond de lit)

Le bassin versant du Rhin â Bâle comptait une superficie de glaciers de 663 km2 aux environs de 1876 (1.9%), 548 km2 vers 1934 (1.5%) et environ 460 km2 en 1973 (1.3%).

Du point de vue climatique, l'extension du bassin du Rhin de la mer du Nord jusqu'aux Alpes fait qu'on y rencontre des zones climatiques très différentes. L'influence la plus grande sur le climat, surtout du point de vue du volume et de la répartition des précipitations, est exercée par le relief et la grande diversité des zones montagneuses. Toutefois la distance par rapport à la mer joue également un rôle très important. On passe ainsi d'un climat maritime au nord à des conditions plus continentales au sud.

La valeur annuelle moyenne des précipitations pour le bassin versant du Rhin à l'amont de Bâle est de 1'420 mm, la valeur correspondante pour le bassin compris entre Bâle et Emmerich de 750 mm. La moyenne des précipitations sur l'ensemble du bassin du Rhin peut être évaluée à environ 910 mm.

2. Le régime général du Rhin de Bâle à la mer du Nord

2.1 Les grands traits du régime naturel

Par comparaison avec les autres grands fleuves d'Europe, le Rhin possède des débits très uniformément répartis. Les raisons de ce régime équilibré peuvent être commentées à l'aide du Tableau 1 et de la Fig. 3 (Evolution des débits du Rhin de Suisse aux Pays-Bas, période 1951 - 1970).

A Bâle, le régime du Rhin, bien que résultant de la combinaison d'apports de cours d'eau à régimes saisonniers différents - glaciaires, nivaux, nivo-pluviaux et pluvio-nivaux - indique toujours nettement la prédominance des facteurs climatiques alpestres (forts débits en été liés au maximum des précipitations durant cette saison ainsi qu'à la fonte des neiges et glaciers, basses eaux en hiver).

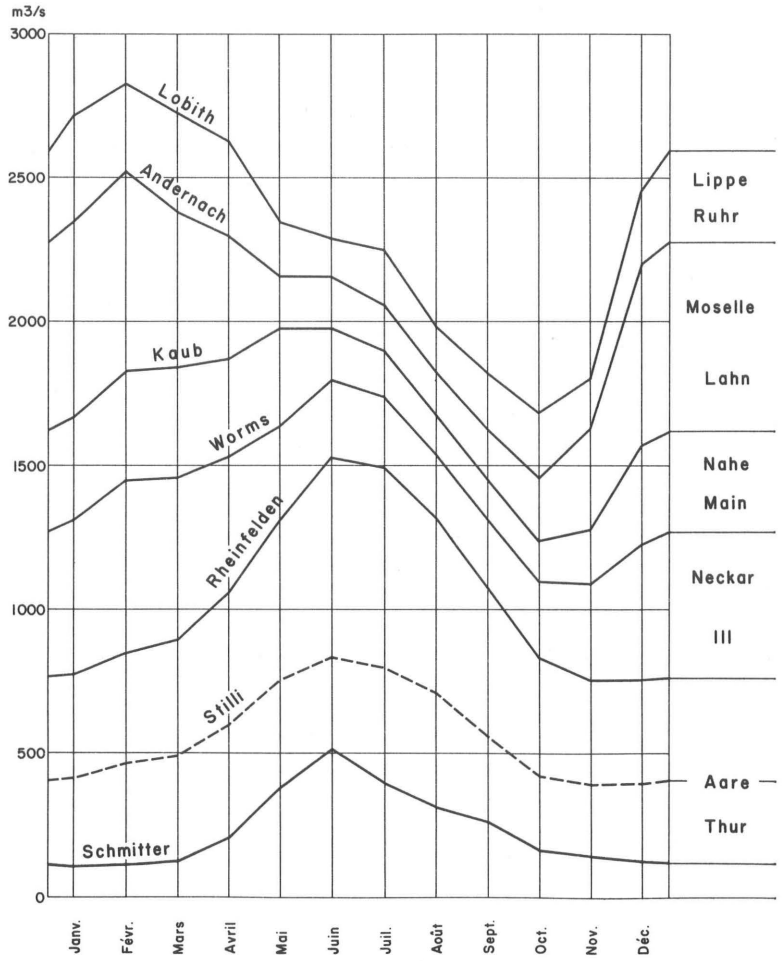


Fig. 3 Evolution des débits du Rhin de la Suisse aux Pays-Bas, période 1951 - 1970

Au delà de Bâle, le caractère alpin du Rhin est peu à peu masqué par les apports d'affluents soumis à un régime de type pluvio-nival, et pluvial océanique. En raison de la nature essentiellement liquide des précipitations durant la saison froide, et du rôle de l'évapotranspiration en période de végétation, ces affluents ont, dans l'ensemble, leurs plus gros débits en hiver.

A Worms, après avoir reçu le Neckar, et encore à Mainz ou Kaub, après jonction avec le Main et la Nahe, les débits les plus forts du Rhin sont encore ceux de juin et juillet. Mais plus à l'aval, les moyennes hivernales égalent celles de l'été et finissent par l'emporter nettement. Ce déplacement des débits maximums du Rhin de l'été vers l'hiver entre Bâle et les Pays-Bas est un trait majeur du régime complexe du Rhin.

Du point de vue du bilan général, l'écoulement étant voisin de 440 mm et les précipitations d'environ 910 mm, le déficit d'écoulement serait de l'ordre de 470 mm. La valeur du déficit annuel restant relativement constante dans l'ensemble du bassin, le coefficient d'écoulement (débits/precipitations) voisin de 50 % pour le Rhin à son entrée en Hollande, peut passer à plus de 75 - 80 %

dans les régions bien arrosées et plus froides. Il varie naturellement aussi selon les saisons.

Les débits d'étiage se placent en saison froide pour le Rhin à caractère alpestre, puis en automne pour le Rhin moyen et inférieur. Au cours du 20ème siècle il faut signaler les années sèches 1921, 1945 à 1950, 1959, 1964 et 1971 à 1976. Il y a lieu de relever, en rapport avec les débits d'étiage, le rôle régulateur des nappes souterraines qui prend une importance croissante de l'amont vers l'aval.

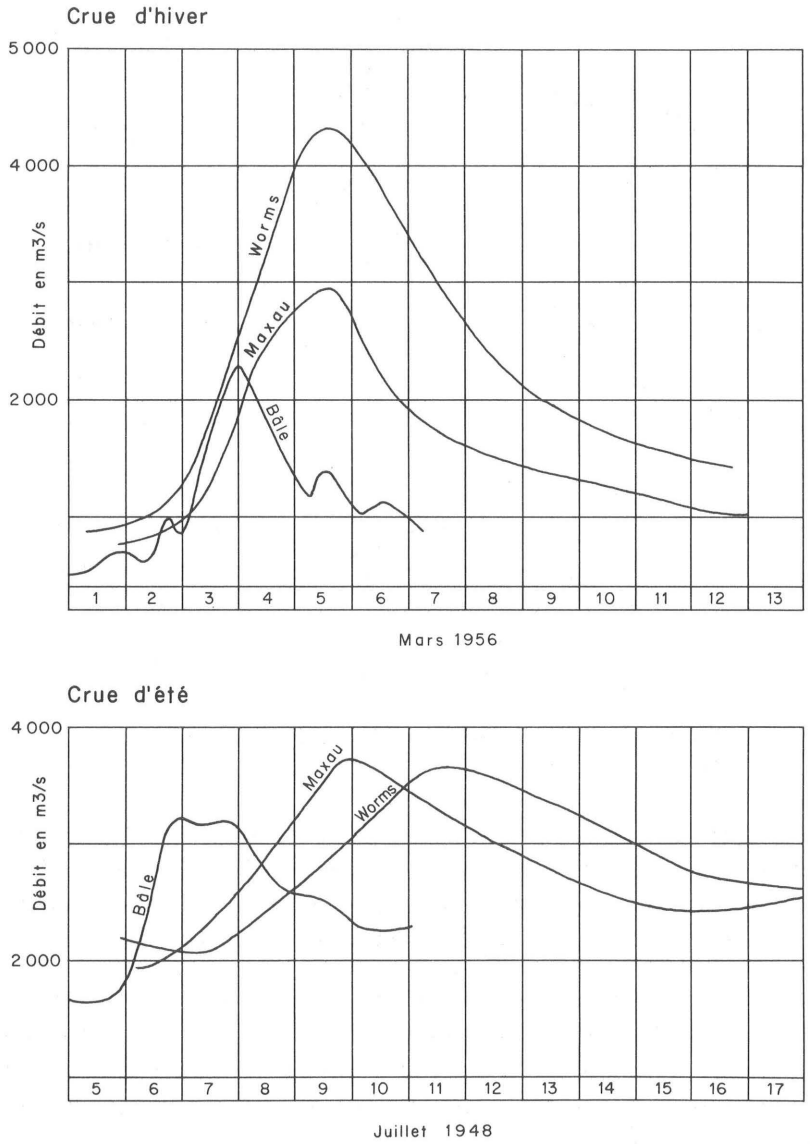


Fig 4 Hydrogrammes d'une crue d'hiver et d'une crue d'été typiques
(Source: Commission d'étude des crues du Rhin)

En ce qui concerne le régime des crues à l'aval de Bâle, il convient de distinguer, pour les raisons déjà invoquées plus haut, les crues d'hiver et les crues d'été. En été, la majeure partie des débits de crue provient du bassin versant à l'amont de Bâle, le rôle des affluents d'aval étant

assez faible. En hiver, le régime des affluents du Rhin à l'aval de Bâle fait qu'à partir de la confluence du Neckar ce sont les crues d'hiver qui prédominent. Cette évolution du régime des crues de Bâle vers l'aval est clairement illustrée dans la Fig. 4.

Voici quelques valeurs maximales de débits de crues: Bâle, juin 1876: 5'700 m3/s; Kaub, décembre-janvier 1882-83: 7'130 m3/s; Cologne, janvier 1926: 11'500 m3/s (12'200 - 13'000 m3/s à l'entrée en Hollande).

Le rôle important joué par le régime du Rhin à Bâle quant à l'abondance et à l'équilibre des débits à l'aval de Bâle, mérite encore d'être souligné quelque peu.

Si l'on compare le module du Rhin à Rheinfelden et à Lobith (période 1951 - 1970), on constate que le 46 % environ du débit annuel moyen du Rhin à Lobith est déjà atteint à Rheinfelden, alors qu'à ce point, la surface du bassin versant n'est que d'environ 1/5 de celle du bassin versant total.

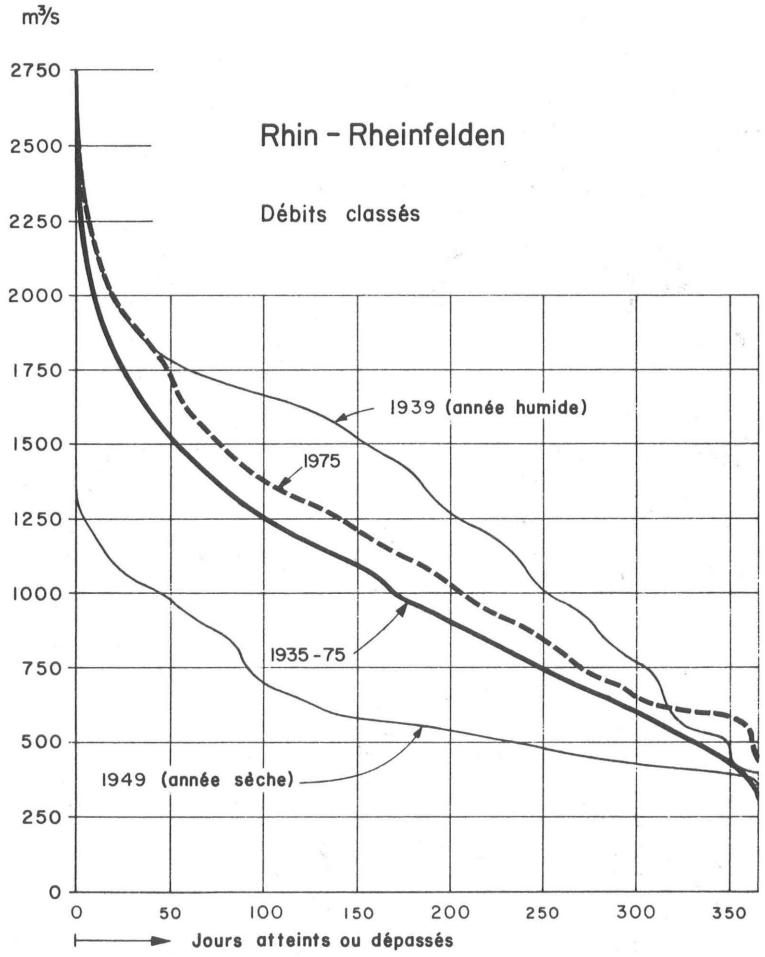


Fig. 5 Rhin - Rheinfelden. Courbe des débits classés

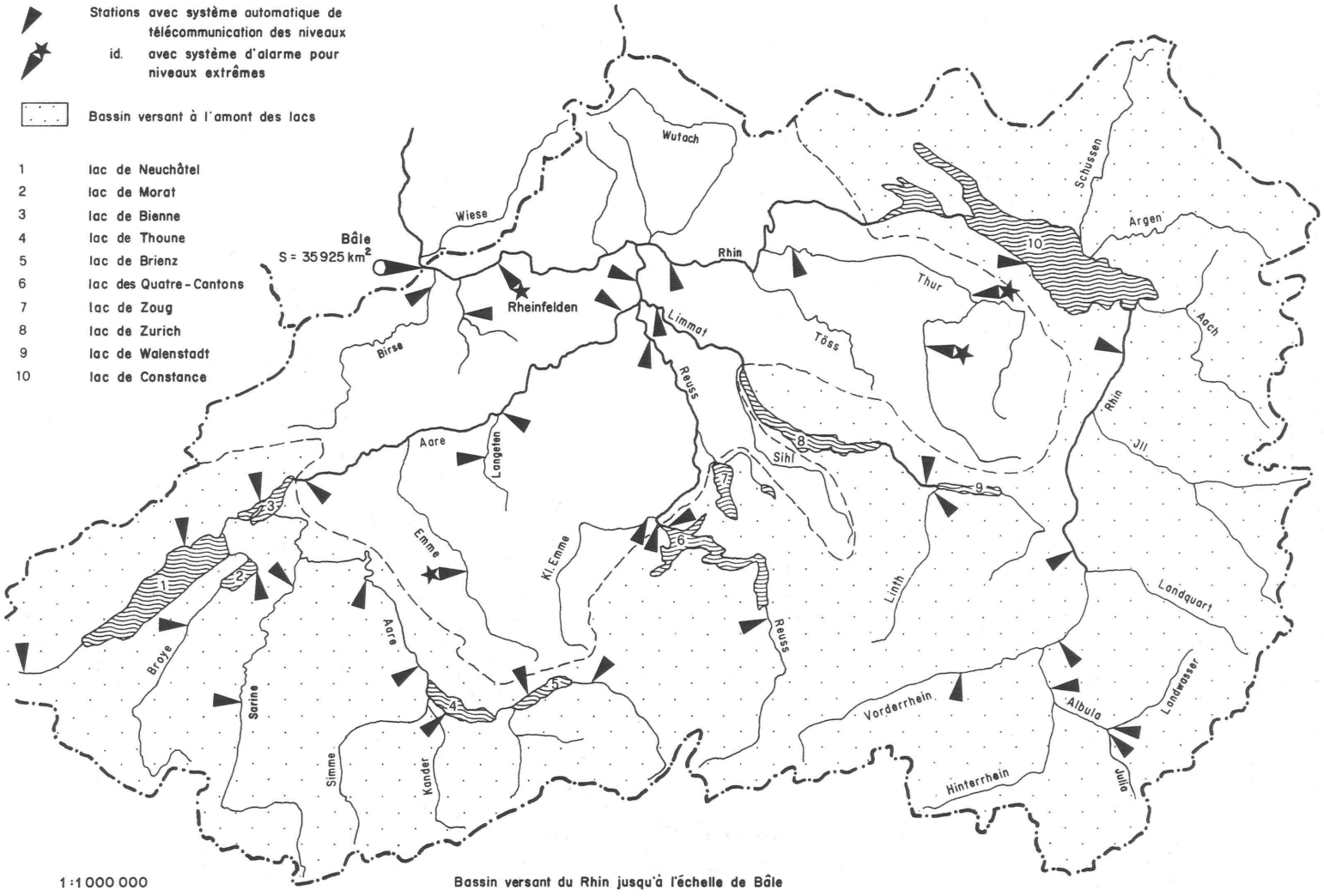


Fig. 6 Bassin versant du Rhin à Bâle, avec indication de la zone sise à l'amont des lacs périalpins et du système de télécommunications des niveaux d'eau

La courbe des débits classés du Rhin à Rheinfelden (Fig. 5) fait aussi apparaître, déjà à la frontière suisse, la persistance de débits favorables à la navigation et à l'utilisation des forces hydrauliques (débit médian et étiages indiquant une abondance très satisfaisante comparée à celle d'autres grands fleuves).

Ces conditions relativement favorables sont dues, comme on l'a vu, à la combinaison heureuse d'apports de cours d'eau à régimes saisonniers différents, au rôle des eaux souterraines, ainsi qu'à l'effet régulateur des lacs périalpins (Fig. 6). Sur les 36'000 km2 du bassin versant du Rhin à Bâle, 24'000 km2 environ (67,5 % du bassin) sont contrôlés par ces lacs dont les effets principaux sont l'amortissement des crues, le relèvement des débits d'étiage à l'aval et le dépôt des transports solides. La Fig. 7 illustre, par exemple, l'effet du lac de Constance sur la crue du Rhin alpin d'août 1954. Cette figure explique aussi pourquoi, dans le développement des grandes crues à l'échelle de Bâle, c'est la portion d'environ 12'000 km2 sise à l'aval des lacs naturels qui joue un rôle de premier ordre. En effet, les précipitations tombant sur cette portion de bassin provoquent des ondes de crues atteignant Bâle en moins de 24 heures, alors que les phénomènes hydrologiques se déroulant à l'amont des lacs sont "amortis" par ces derniers.

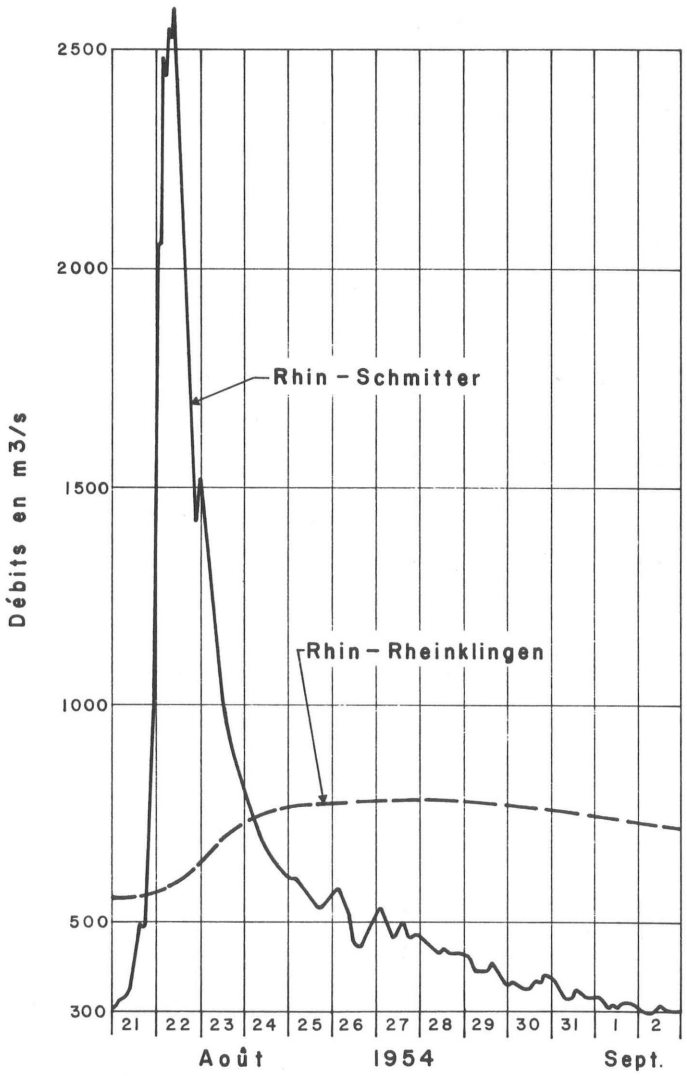


Fig. 7 Amortissement des crues par les lacs (crue du mois d'août 1954 à l'entrée et à la sortie du lac de Constance)

Tableau 1: Débits du Rhin de la Suisse aux Pays-Bas (m3/s)

Période: 1951 - 1970

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année Module	Q Min.	Q Max.
Schmitter (1962-1970)	109	115	126	208	386	516	397	317	264	165	142	122	239	58.2	1420
(Aar-Stilli)	415	468	495	598	753	834	799	712	557	424	395	396	557	138	2050
Rheinfelden	771	850	893	1056	1313	1525	1494	1320	1075	835	756	754	1054	315	3710
Worms	1310	1450	1460	1530	1640	1800	1740	1540	1320	1100	1090	1230	1440	408	5600
Kaub	1670	1830	1840	1870	1980	1980	1900	1680	1460	1250	1280	1570	1670	482	6700
Andernach	2350	2520	2380	2300	2160	2160	2060	1830	1630	1460	1630	2200	2060	560	10030
Rees *)	2830	2950	2830	2730	2450	2410	2370	2090	1920	1770	1920	2650	2410	590	9950
Lobith *)	2717	2829	2724	2629	2347	2290	2250	1982	1828	1684	1800	2458	2292	694	9850

*) Les valeurs de débits à Lobith, généralement inférieures à celles de Rees, peuvent s'expliquer par les méthodes différentes de détermination des débits à ces deux échelles.

2.2 Exemples de grandes interventions techniques et leur influence sur le régime d'écoulement des eaux à l'aval de Bâle

Depuis le début des observations hydrométriques du Rhin au début du 19ème siècle, les causes principales de modifications du régime d'écoulement des eaux du fleuve sont les suivantes:

- travaux d'aménagements hydrauliques
- utilisation des forces hydrauliques (y.c. exploitation des bassins-réservoirs)
- régularisation des lacs
- travaux d'assainissements agricoles
- reboisement
- urbanisation.

2.2.1 Bassin versant à l'amont de Bâle

Comme exemples d'interventions majeures ayant modifié l'écoulement du Rhin à Bâle et vers l'aval, on signalera la Ière Correction des eaux du Jura, ainsi que l'aménagement et l'exploitation des réservoirs artificiels.

Ière Correction des eaux du Jura. La dérivation de l'Aar dans le lac de Bienne entreprise dès 1878 a exercé son plein effet seulement vers 1890. La mise à contribution des possibilités de rétention du lac de Bienne a eu pour effet de réduire les pointes de crues à Bâle et de retarder l'arrivée à Bâle du débit de pointe. Selon les études statistiques de la délégation suisse à la Commission d'étude des crues du Rhin, les modifications de ces débits de pointe à Bâle sont les suivantes (HQ 100 = crue centenaire):

	Semestre d'été HQ 100 (m3/s)	Semestre d'hiver HQ 100 (m3/s)
Période 1808/1890	5000	4500
Période 1891/1973	4000	3900

Le déroulement dans le temps de l'aménagement de réservoirs artificiels pour la production d'énergie électrique est illustré dans la Fig. 8. Entre 1920 et 1980 le volume utile des réservoirs de retenue passe de quelques 100 millions de m3 à environ 1900 millions de m3. Les réservoirs artificiels des Alpes n'ont pas d'influence directe quant au régime des crues à Bâle puisque leurs effets sont amortis par les lacs périalpins. Toutefois, comme ces bassins sont remplis en été et vidés en hiver, les débits du Rhin à Bâle sont, par rapport aux conditions naturelles, quelque peu réduits en été (mai-octobre) pour être augmentés en moyenne des valeurs suivantes en hiver

octobre (2ème moitié)	20 m3/s
novembre	45 m3/s
décembre	75 m3/s
janvier	100 m3/s
février	125 m3/s
mars	135 m3/s
avril	100 m3/s
mai (1ère moitié)	20 m3/s

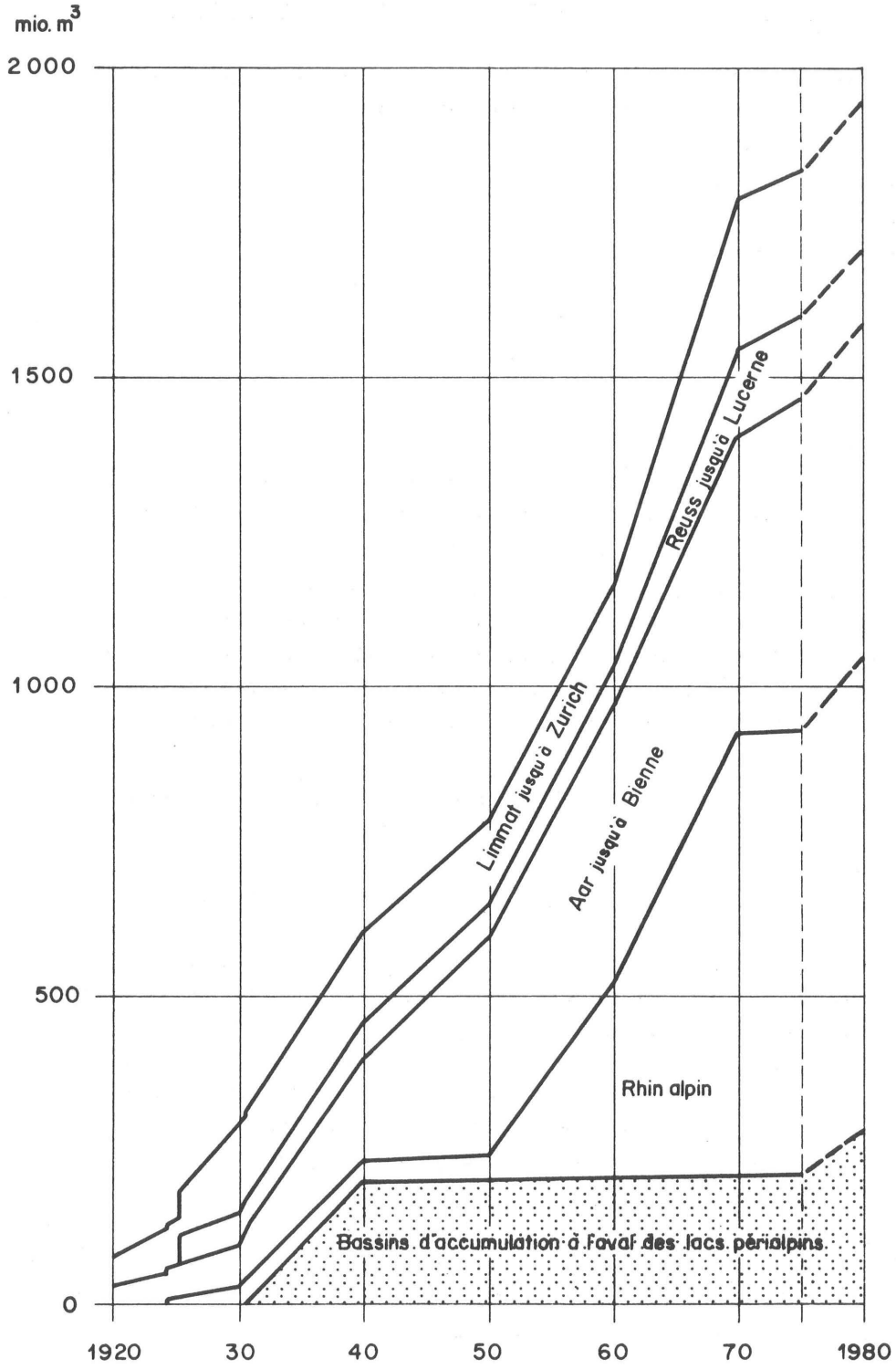


Fig. 8 Volume total utilisable des bassins d'accumulation à l'amont de Bâle

Du point de vue de la navigation qui nous intéresse particulièrement ici, on constate donc que cette intervention technique a plutôt des effets favorables puisqu'elle contribue à relever les débits d'étiage du Rhin à Bâle.

2.2.2 Bassin versant du Rhin à l'aval de Bâle

Parmi les nombreuses interventions techniques dont le Rhin a été l'objet à l'aval de Bâle, nous en commenterons deux en raison des répercussions notables qu'elles ont entrainées sur les conditions de navigation à destination de Bâle: la correction de Tulla et la régularisation du Rhin.

La correction de Tulla (Correction du lit par endiguements et tracé d'un chenal à grands tronçons rectilignes entre Bâle et l'embouchure du Main).

Entre Bâle (P.K. 170,0) et le confluent de la Murg (P.K. 344,6) un lit régulier a été aménagé entre 1840 et 1884 pour le fleuve qui était jusqu'alors très sauvage et s'écoulait en de nombreux méandres. L'essentiel des travaux en Alsace a été réalisé entre 1840 et 1860. L'ancien cours a été raccourci de 14 % et le nouveau lit créé permit d'écouler environ le double du débit moyen. Le lit mineur du fleuve a été limité par deux rives parallèles aussi rectilignes que possible distantes de 220 - 250 m suivant les secteurs. Le lit majeur, où ne s'étalaient que les crues importantes, a été bordé par un système de digues de hautes eaux.

La régularisation du Rhin

Si la correction de Tulla a permis d'améliorer la protection contre les crues et la salubrité de la région, il a fallu, pour permettre à la navigation moderne de se développer, stabiliser, par la construction de nombreux épis, un chenal navigable d'environ 80 m de largeur ondulant entre les berges fixées par la correction de Tulla. A l'aval de cette correction, de nombreux travaux furent aussi entrepris en vue d'améliorer les conditions de navigabilité (coupures de méandres, aménagement d'épis etc.).

Effets de la correction de Tulla. Le profil en long du Rhin semble avoir été stable en Alsace avant les travaux de correction et de régularisation. Avec la correction de Tulla qui a considérablement raccourci le fleuve, la pente et la force d'entraînement de ce dernier ont fortement augmenté. A leur entrée dans la plaine d'Alsace, les eaux du Rhin se chargèrent 'alluvions et l'érosion progressa rapidement de l'amont vers l'aval, surtout à l'aval des barres rocheuses de Kirchen (P.K. 176) et d'Istein (P.K. 179). Les travaux de régularisation n'ont pas eu d'influence importante sur cette érosion.

On peut illustrer l'érosion en représentant l'abaissement de la ligne d'eau correspondant à un débit d'étiage donné. La Fig. 9 montre la variation entre Bâle et Worms depuis 1828 du plan d'eau correspondant à un débit de 540 m3/s à Bâle.

L'érosion consécutive à la correction de Tulla (notamment entre Kembs et Breisach) fut à l'origine de difficultés pour la navigation mais elle a entraîné aussi une mise hors service d'une partie importante des champs d'inondation, d'où une diminution des volumes de rétention en cas de crues importantes. D'autre part, l'aménagement hydro-électrique entre Breisach et Strasbourg et la poursuite de l'aménagement des chutes de Gambsheim, Iffezheim et Au-Neuburg (en projet) sont la cause d'une réduction supplémentaire des champs d'inondation. La conjugaison des effets de ces diverses inter-

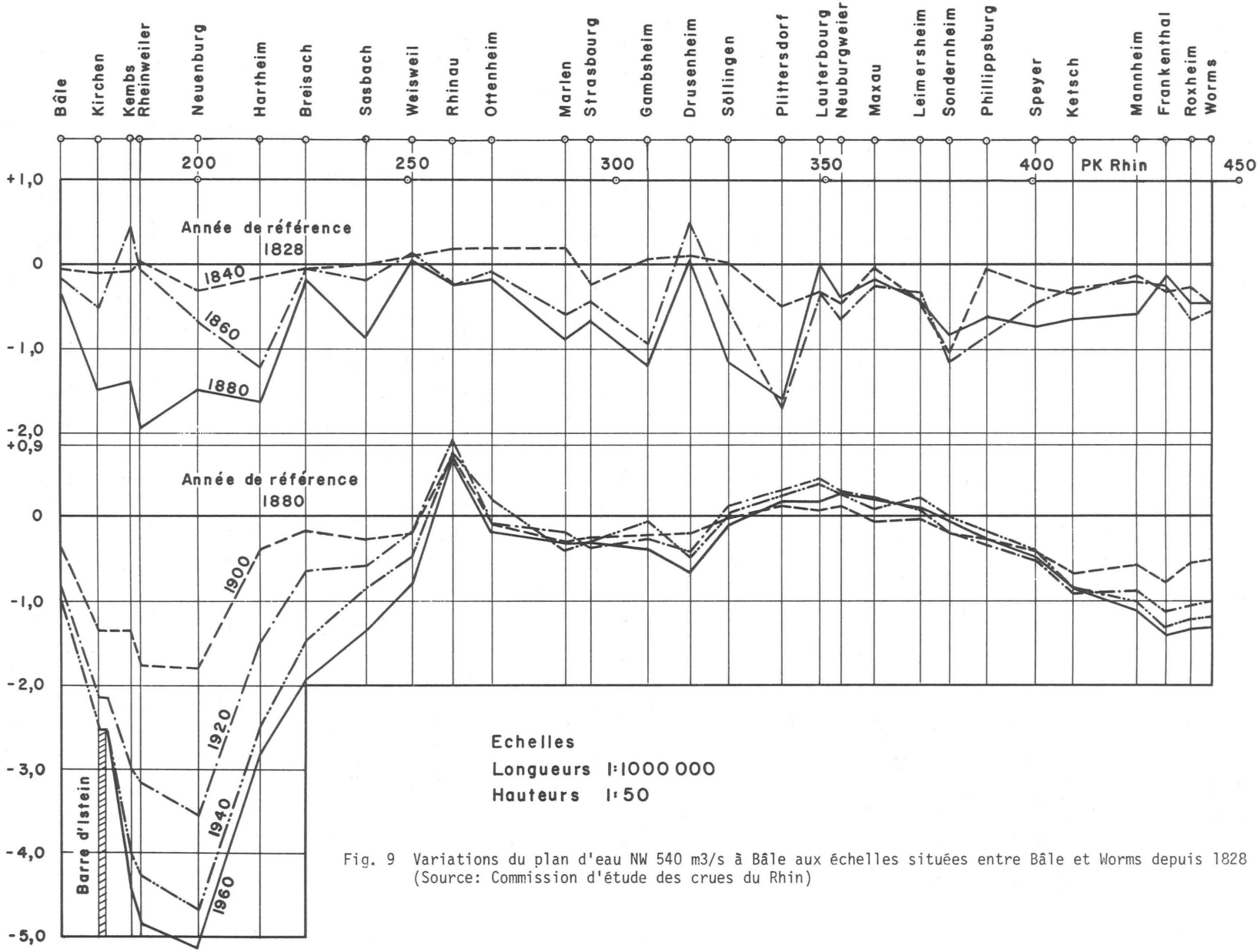
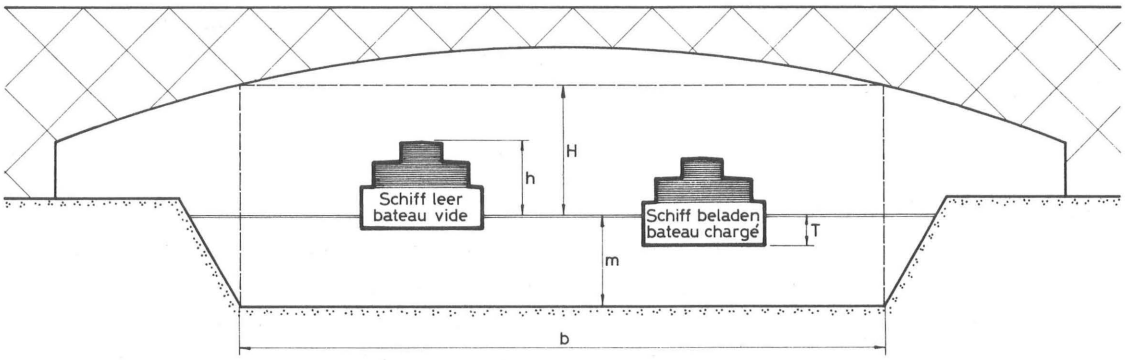


Fig. 9 Variations du plan d'eau NW 540 m3/s à Bâle aux échelles situées entre Bâle et Worms depuis 1828 (Source: Commission d'étude des crues du Rhin)

ventions a fait que, pour la région sise à l'aval de Au-Neuburg, il en est résulté un danger accrû d'inondations (pointes de crues du Rhin plus élevées, propagation plus rapide de ces pointes, danger de superposition avec les pointes de crues des affluents, notamment dans la zone de confluence du Neckar).

3. Aspects hydrologiques intéressant particulièrement la navigation

Les considérations du chapitre 2 ont montré que, d'une façon tout à fait générale, le régime très équilibré du Rhin à Bâle et à l'aval de Bâle, est bénéfique pour cette voie navigable dont le trafic se situe parmi les plus forts du monde.



m	=	Fahrwassertiefe	mouillage dans le chenal
T	=	Tiefgang	tirant d'eau
h	=	Fixpunkthöhe	tirant d'air
H	=	Freie Durchfahrtshöhe	hauteur libre
b	=	Fahrwasserbreite	largeur du chenal
n	=	Benetzter Querschnitt / Eingetauchter Schiffsquerschnitt	section transversale mouillée / section transversale mouillée du bateau

Fig. 10 Terminologie de la voie navigable

Les aspects du régime d'écoulement des eaux du Rhin intéressant particulièrement la navigation (Fig. 10) sont

- le problème des hautes eaux
- le problème des basses eaux
- le problème des glaces.

3.1 Le problème des hautes eaux

Il intéresse la navigation essentiellement sous deux aspects:

a) restrictions des possibilités de naviguer à proximité des rives sous l'action des vagues engendrées par les bateaux (réduction de vitesse et concentration des bateaux vers le centre du chenal navigable)

b) interruption de la navigation sur certains secteurs à Strasbourg et à l'amont lorsque la hauteur libre devient insuffisante (sous les ponts routiers ou ferroviaires) ou lorsque le niveau est tel que même la navigation au centre du chenal provoque des dégâts inadmissibles (vagues).

Ces impératifs ont conduit à la définition, pour les échelles limnimétriques importantes, des "plus hautes eaux navigables", dont le niveau I entraine les restrictions de navigation visées sous a) et le niveau II l'interruption de toute navigation. Pour l'échelle de Rheinfelden ces niveaux respectifs correspondent aux cotes 263.50 et 264.50.
En moyenne, les niveaux II ne sont atteints ou dépassés que durant environ 3 jours par an.

La prévision à court terme des crues étant chose très difficile à partir des paramètres hydro-météorologiques, on comprend toute l'importance pour la navigation des réseaux de télécommunications, notamment en ce qui a trait aux informations directes sur l'évolution des débits et niveaux à l'amont comme à l'aval de Bâle.

3.2 Le problème des basses eaux

Les niveaux d'étiage jouent un rôle très important pour la navigation puisqu'il s'agit de maintenir sur les seuils et hauts fonds du chenal navigable un mouillage supérieur au gabarit choisi. Le problème se pose sur les secteurs du Rhin à courant libre. Pour les secteurs aménagées (canaux latéraux, solution en festons, ou aménagements au fil de l'eau) la combinaison des écluses avec des aménagements hydro-électriques fait qu'un mouillage suffisant est assuré à l'amont des chutes. Un problème particulier demeure le maintien d'un mouillage suffisant sur le busc aval des écluses, là où l'on passe d'un secteur aménagé à un secteur à courant libre soumis à l'érosion.

Pour les périodes et les secteurs où le mouillage dans le chenal navigable est insuffisant pour le tirant d'eau des bateaux entrant en ligne de compte, ces derniers doivent être délestés d'une part de leur cargaison, en faisant appel à une flotte de réserve, ce qui entraîne, du point de vue économique, des répercussions considérables. Lors de basses eaux extrêmes, il peut arriver que la navigation soit interrompue (non rentabilité des convois avec très faible cargaison, risque de dommages aux bateaux en raison du mouillage insuffisant, risque d'échouage).

L'importance du niveau d'eau en période d'étiage a conduit la Commission centrale pour la navigation du Rhin à définir un "étiage équivalent EE" de façon à disposer pour les travaux d'aménagement, dans tous les secteurs, de valeurs comparables par rapport à une cote de référence (EE est un niveau de basses eaux qui, en moyenne, n'est pas atteint ou dépassé pendant 20 jours sans glace par an).

La notion d'étiage équivalent intervient de façon particulièrement déterminante en rapport avec les travaux d'aménagement du Rhin visant à lutter contre les effets néfastes de l'érosion.

Les dangers que présentaient pour la navigation et les installations portuaires l'évolution de l'érosion entraînée par la correction de Tulla ont été reconnus très tôt déjà. La navigation à destination de Bâle avait failli être interrompue par la barre rocheuse d'Istein. Fort heureusement, le début de l'aménagement du Grand Canal l'Alsace avec le barrage de Kembs et ses écluses en

1932 a permis de résoudre momentanément le problème d'Istein. Après la guerre, les paliers hydro-électriques et les écluses se succédèrent à un rythme régulier. L'érosion supprimée à l'amont de chaque chute reprenait son action à l'aval de sorte qu'aujourd'hui, après achèvement des paliers de Gambsheim et Iffezheim à l'aval de Strasbourg, une nouvelle chute est projetée à Au-Neuburg, sans pour autant que ce problème de l'érosion et, partant, les problèmes de navigation en basses eaux, ne soient définitivement résolus.

3.3 Les glaces et embâcles

Les glaces et embâcles constituent des entraves à la navigation en même temps qu'un danger d'inondation. Dans les eaux courantes, à l'exception des endroits protégés dans lesquels peuvent se développer des glaces de rives, c'est essentiellement à partir du fond que se forment les glaces. En effet, l'eau en surfusion au dessous de zéro degré ne peut se transformer en glace en surface en raison du courant. Lorsque cette eau en surfusion est ramenée vers le fond par suite de tourbillons, elle se transforme en aiguilles de glace à la faveur de la vitesse plus faible de l'écoulement. La poussée fait remonter cette glace de fond en surface où elle forme des blocs de plus en plus grands.

Aux endroits défavorables du fleuve (rétrécissements, courbes brusques, zones d'augmentation de profondeurs avec réduction de la vitesse du courant) un effet de blocage entraîne la formation d'embâcles.

Ces conditions se produisent essentiellement à deux endroits sur le Rhin:

- en amont de la Loreley (courbes brusques, voie étroite, profondeur atteignant jusqu'à 20 m)
- dans la zone côtière où la marée de la mer du Nord pénètre dans les bras du Rhin et bloque l'écoulement du fleuve. Les blocs de glace ainsi retenus dans un milieu à écoulement nul s'agglomèrent rapidement en une couche continue.

La Fig. 11 montre la répartition des glaces sur le Rhin pendant l'hiver 1942 (parcours où la couche de glace recouvrait la largeur entière de la rivière).

Il faut relever, que, ensuite des nombreux aménagements sur le Rhin et ses affluents, certains secteurs critiques pour le développement des glaces durant des décennies, ne présentent depuis quelques années plus de dangers. L'augmentation de la température de l'eau, de la pollution et de la salinité ne sont pas étrangers à cette "amélioration" - du point de vue de la navigabilité - des conditions hydrologiques du Rhin.

4. Importance pratique de la station hydrométrique de Rheinfelden pour la navigation rhénane

Cette station fait partie du réseau hydrométrique fédéral exploité par la Division de l'Hydrographie nationale de l'Office fédéral de l'économie hydraulique. Elle est une des stations de ce réseau équipées d'installations de téléindications des niveaux et de déclenchement automatique d'alarmes en cas de crues ou basses eaux extrêmes (Fig. 6). Elle revêt une importance centrale pour toute la navigation rhénane de Hollande à Rheinfelden.

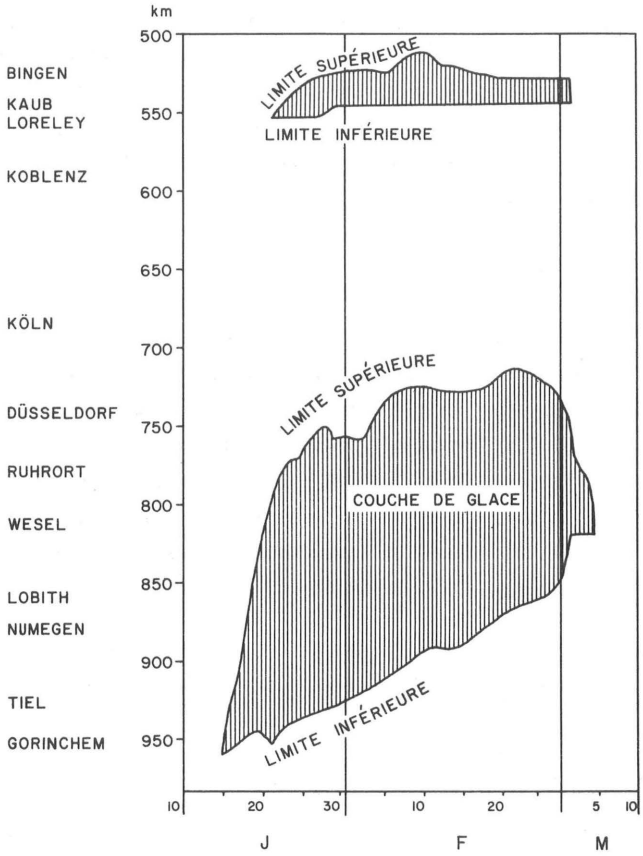
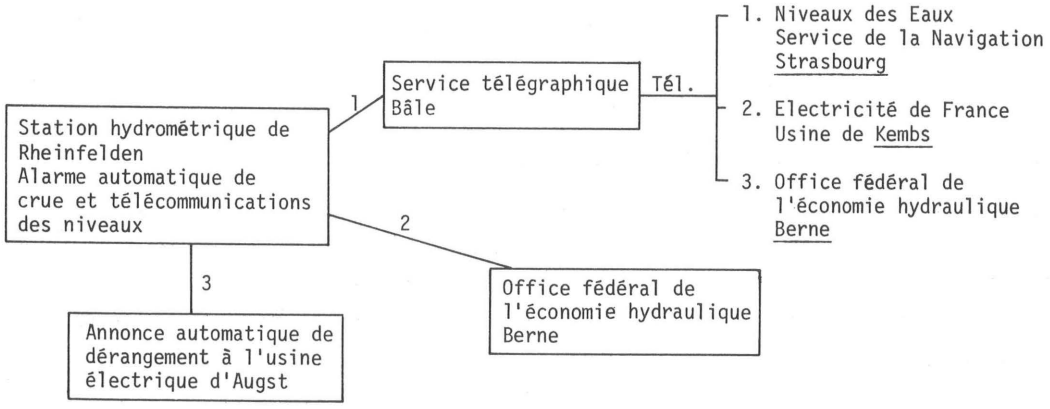


Fig. 11 Répartition des couches de glace sur le Rhin, hiver 1942 (Source: Commission internationale de l'hydrologie du Bassin du Rhin)

La Fig. 12 indique les cotes pour lesquelles une alarme automatique est déclenchée et transmise aux services administratifs suisses et étrangers concernés selon le schéma ci-dessous:

Alarme de crues Rhin - Rheinfelden



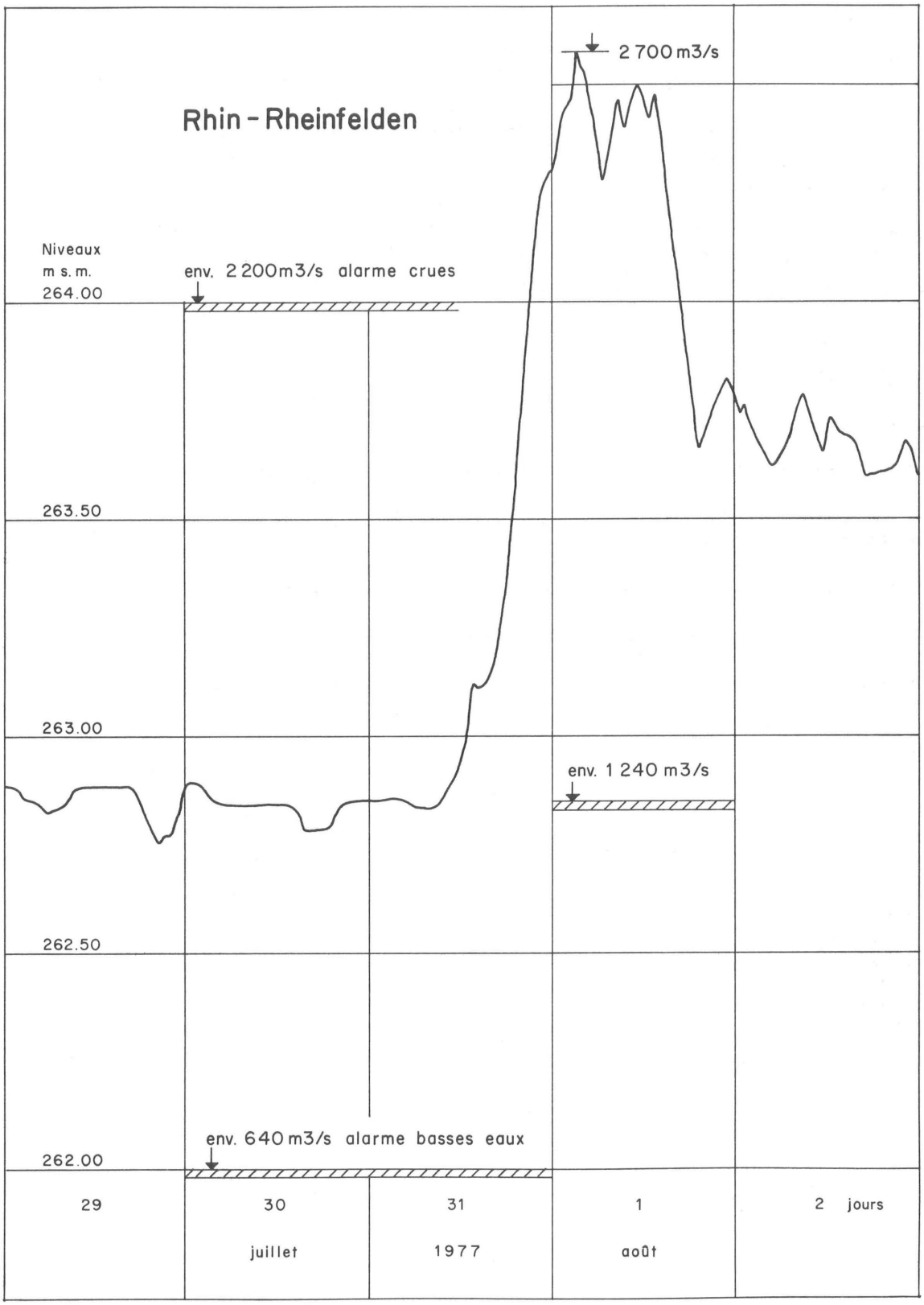


Fig.12 Rhin - Rheinfelden. Crue de juillet-août 1977, avec indication des niveaux de déclenchement d'alarmes

Niveaux transmis

Alarme de basses eaux	262.00 m s.m. env.	630 m3/s
Alarme de crues	264.00 m s.m. env.	2'200 m3/s

Par ailleurs, l'administration portuaire de Bâle-Ville interroge 3 fois par jour la station de Rheinfelden et met les informations à disposition des autorités responsables de la navigation en Hollande, en Allemagne et en France.

Enfin, la cote du Rhin à Rheinfelden, en même temps que celle d'autres échelles importantes à l'aval de Bâle, est communiquée chaque matin de bonne heure à l'ensemble des intéressés dans le premier bulletin d'informations de la radio suisse alémanique.

Bibliographie sommaire:

- Annuaire hydrographique de la Suisse, 1975

- Commission internationale d'étude des crues du Rhin. Rapport final à paraître en 1978

- Commission internationale de l'hydrologie du bassin du Rhin. Monographie du Bassin du Rhin, à paraître au printemps 1978

- Le Rhin, No spécial de la Houille blanche, No 2, mars-avril 1959, Grenoble

- Le Rhin, No spécial de la revue cours d'eau et énergie, No 5-6, 1975

- Gewässerkundliche Probleme beim Ausbau des Oberrheins, W. Bensing, Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Heft 4, 1966

- L'érosion des fonds, conséquence secondaire de la protection de la plaine d'Alsace par l'endiguement longitudinal du Rhin, D. Jeanpierre, Société hydrotechnique de France, Xème Journées de l'Hydraulique, Paris 1968

Adresse de l'auteur:

Dr. Ch. Emmenegger
Directeur-suppléant
Office fédéral de
l'économie hydraulique
Postfach 2743
3001 Bern

Abflussprognosen für den Rhein in Rheinfelden

D. Vischer

1. Einleitung

In Basel, das heisst rund 20 km flussabwärts von Rheinfelden, wendet sich der Rhein bekanntlich von der Schweiz weg nach Norden und fliesst durch Frankreich, Deutschland und die Niederlande zur Nordsee. Prognosen für den Rheinabfluss in Rheinfelden stossen daher auf internationales Interesse. In der Tat werden sie auch von einer internationalen Arbeitsgruppe gefördert, die im Jahre 1954 ins Leben gerufen wurde und folgende Partner umfasst:

- Die vom Kraftwerk Laufenburg und der Electricité de France (EdF) betriebenen Kraftwerke am Rhein. Sie benützen die Prognosen zur Optimierung ihres Kraftwerkbetriebes und zur Wahl günstiger Zeiten für die Revisionen von Maschinengruppen und die Verwirklichung von Bauvorhaben.
- Die durch die Zuiderzeewerke und die Rijncommissie vertretene niederländische Wasserwirtschaft. Für sie ist der Rhein ja der grösste Süsswasserlieferant, gleichermassen wichtig für die Trink- und Brauchwasserversorgung wie für die Landwirtschaft.
- Die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz (BRD), welche die Prognosen für Rheinfelden in ein eigenes Vorhersagemodell, das noch in Entwicklung begriffen ist, einbaut. Dieses Modell soll unter anderem auch den Bedürfnissen der Schiffahrt dienen.
- Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH in Zürich, welche die Prognosen herausgibt, weil sie an deren Entwicklung im Rahmen ihrer hydrologischen Forschungsprojekte ein wissenschaftliches Interesse hat.

Der Prognosendienst zu Handen dieser Arbeitsgruppe läuft seit dem hydrologischen Jahr 1954/55. Er umfasst sowohl Langfristprognosen als auch Kurzfristprognosen; die ersteren beziehen sich auf die Prognoseperioden von 1 bis mehreren Monaten, die letzteren auf solche von 1 bis 3 Tagen.

2. Langfristprognosen

Im Zusammenhang mit den Langfristprognosen ist von Bedeutung, dass die Winterabflüsse des Rheins kleiner sind als die Sommerabflüsse. Dieses für den Hochrhein typische Verhältnis findet sich am Niederrhein nicht mehr, wo die Winterabflüsse gegenüber den Sommerabflüssen überwiegen. Unterhalb von Rheinfelden findet also eine wesentliche Veränderung des Abflussregimes statt. Ein Blick auf die von van der Made /1/ gezeichneten und in Abb. 1 wiedergegebenen Abflussganglinien für den Rheinabfluss in Basel und in Lobith veranschaulicht dies. Die Differenz, d.h. gewissermassen die Ganglinie der Zuflüsse aus dem Zwischeneinzugsgebiet, zeigt deutlich folgendes: Die Sommerabflüsse des Rheins in Basel und damit auch in Rheinfelden machen den Hauptanteil der Sommerabflüsse des ganzen anschliessenden Rheinlaufes aus. Dies erklärt, weshalb das Interesse an Langfristprognosen für den Rhein in Rheinfelden besonders für die Sommermonate gross ist.

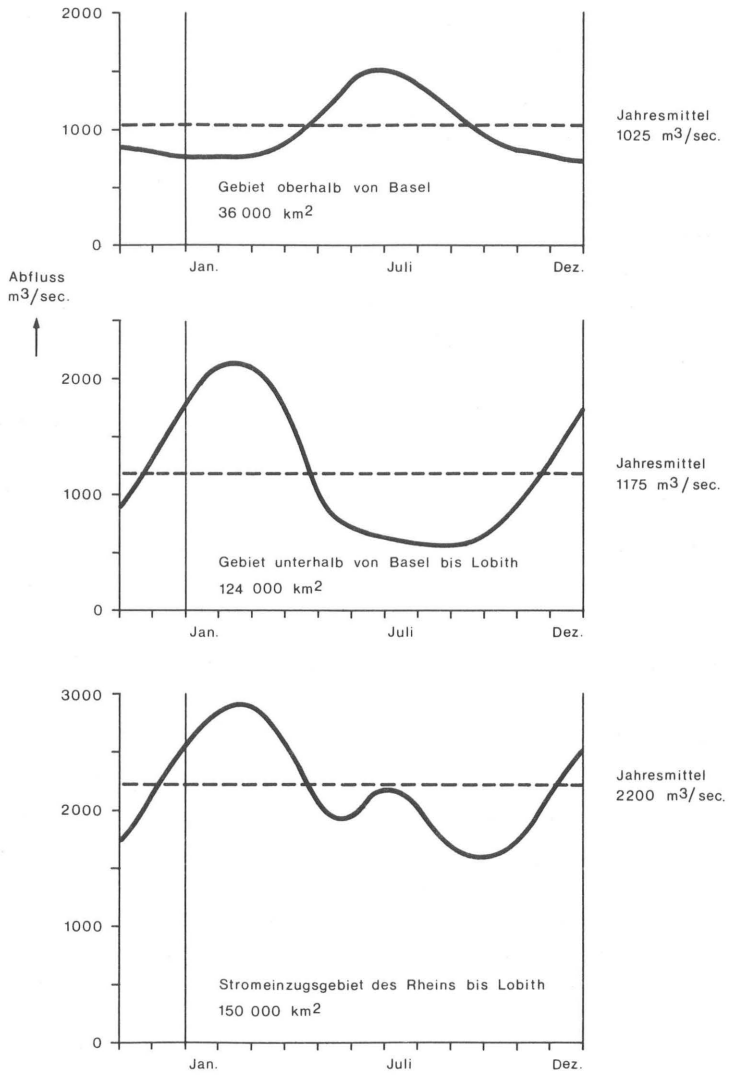


Abb. 1 Mittlere Abflüsse des Rheins in Basel (oben) und in Lobith (unten). Mittlere Zuflüsse des Zwischeneinzugsgebietes (Mitte)

2.1 Prognoseperioden und Prognoseformeln

Die Langfristprognosen für den Rhein in Rheinfelden werden das ganze Jahr hindurch zu Beginn eines jeden Monats berechnet und zu Handen der Partner in der Arbeitsgruppe herausgegeben. Sie beziehen sich im Winter auf die Monatsmittel der nächstfolgenden 1 bis 2 Monate und im Sommer auf diejenigen der nächstfolgenden 1 bis 8 Monate. Abb. 2 vermittelt eine graphische Uebersicht über die jeweiligen Prognoseperioden.

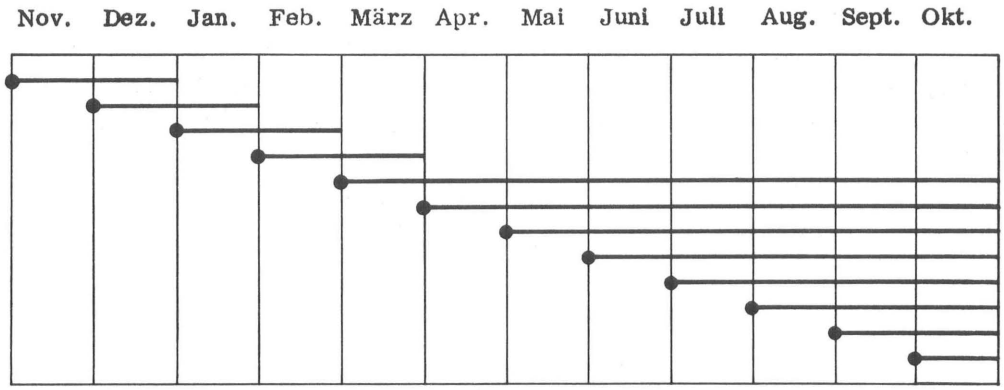


Abb. 2 Langfristprognosen Rhein/Rheinfelden: Ausgabezeitpunkte und Prognoseperioden innerhalb eines Jahres

Die Prognoseformeln werden aufgrund von linearen Regressionsanalysen aufgestellt. Sie verknüpfen also die hydrometeorologischen Einflussgrössen linear mit den Regressionskoeffizienten und stellen damit Produktsummen dar, die einfach zu handhaben sind. Näheres über ihre Entwicklung findet sich in früheren Veröffentlichungen /2, 3, 4/. Hier sei lediglich ein Beispiel angeführt, das auch in Abb. 3 veranschaulicht wird.

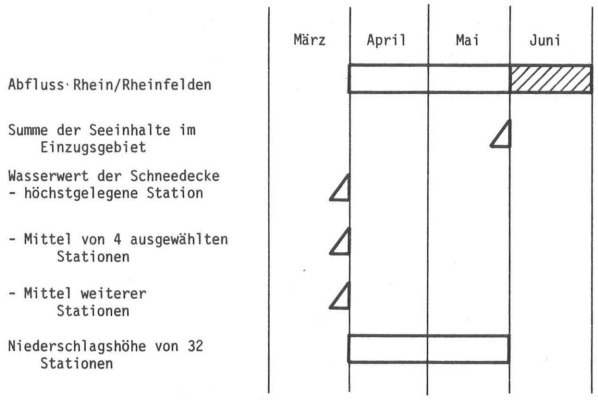


Abb. 3 Langfristprognosen Rhein/Rheinfelden, Messzeitpunkte und Summationsintervalle der Einflussgrössen und der Zielgrösse (schraffiert) für die Ausgabe am 1. Juni

<u>Beispiel 1:</u> Prognose, die am 1. Juni für den Monat Juni herausgegeben wird

Zielgrösse: - Abfluss im Monat Juni

Einflussgrössen:
- Summe der Speicherinhalte von 8 Seen im Einzugsgebiet am 31. Mai
- Wasseräquivalent der Schneedecke der höchstgelegenen Station (2540 m ü.M.) am 31. März
- Wasseräquivalent als Mittel von 4 ausgewählten Stationen am 31. März
- Wasseräquivalent als Mittel von 7 weiteren Stationen am 31. März
- Niederschlagshöhen von 32 Stationen im April und Mai
- Abfluss des Rheins bei Rheinfelden im April und Mai

Die Prognosegleichung umfasst in diesem Fall also 6 Einflussgrössen bzw. Regressionsvariablen, wovon sich drei auf das Wasseräquivalent der Schneedecke, eine auf den Inhalt der Seen, eine auf die Niederschläge und eine auf den vorangehenden Abfluss beziehen. Die Lage der für die Langfristprognosen berücksichtigten Messstationen innerhalb des Einzugsgebietes ist in Abb. 4 angegeben.

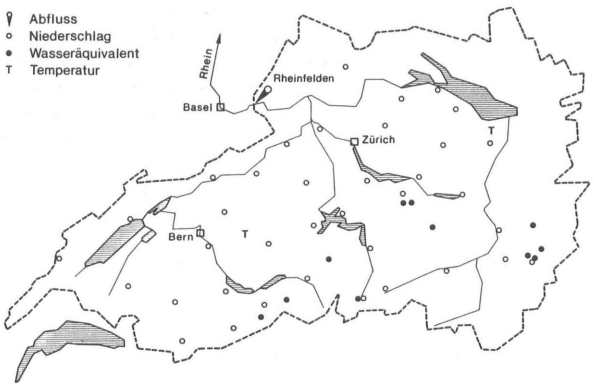


Abb. 4 Einzugsgebiet Rhein/Rheinfelden: Messstationen, die für die Langfristprognosen berücksichtigt werden

Am 1. Juni dieses Jahres werden aber, wie Abb. 2 ja andeutet, nicht nur der Abfluss für den Monat Juni, sondern auch die Abflüsse für die Monate Juni und Juli, Juni bis August, Juni bis September und Juni bis Oktober, also für die zwei bis fünf Monate umfassenden Prognoseperioden herausgegeben.

2.2 Ergebnisse

Wie schon mehrfach erwähnt, sind die Langfristprognosen vor allem für den Sommer interessant. Deshalb sind in Abb. 5 als Beispiel die Ausgaben für die Sommermonate des Jahres 1975 wiedergegeben. Die stark ausgezogenen Linien stellen Summenkurven dar, die vom Abfluss mit 90 bzw. 10 % Wahrscheinlichkeit überschritten werden. Sie schliessen demnach das Intervall ein, das mit 80 % Wahrscheinlichkeit den Abfluss enthalten wird. Die strichlierte Linie stellt die Summenkurve dar, die vom Abfluss mit 50 % über- oder unterschritten wird. Zusätzlich sind mit feinen Linien noch die Maxima und Minima der über fünfzigjährigen Messperiode angegeben.

Von Monat zu Monat werden also im wesentlichen solche Diagramme als Langfristprognosen herausgegeben. Die Benützer tragen dann laufend die beobachteten Werte ein und können somit ihre Vergleiche ziehen. In Abb. 5 sind diese beobachteten Werte mit einer punktierten Linie hervorgehoben.

Es zeigt sich im schneereichen Jahr 1975 deutlich, dass die Ausgabe der Sommerabflussprognosen besonders dann sinnvoll ist, wenn die Schneereserven des Einzugsgebietes im Frühjahr gross sind. Aber auch im schneearmen Jahr 1976 erwiesen sich diese Prognosen als zutreffend und nützlich.

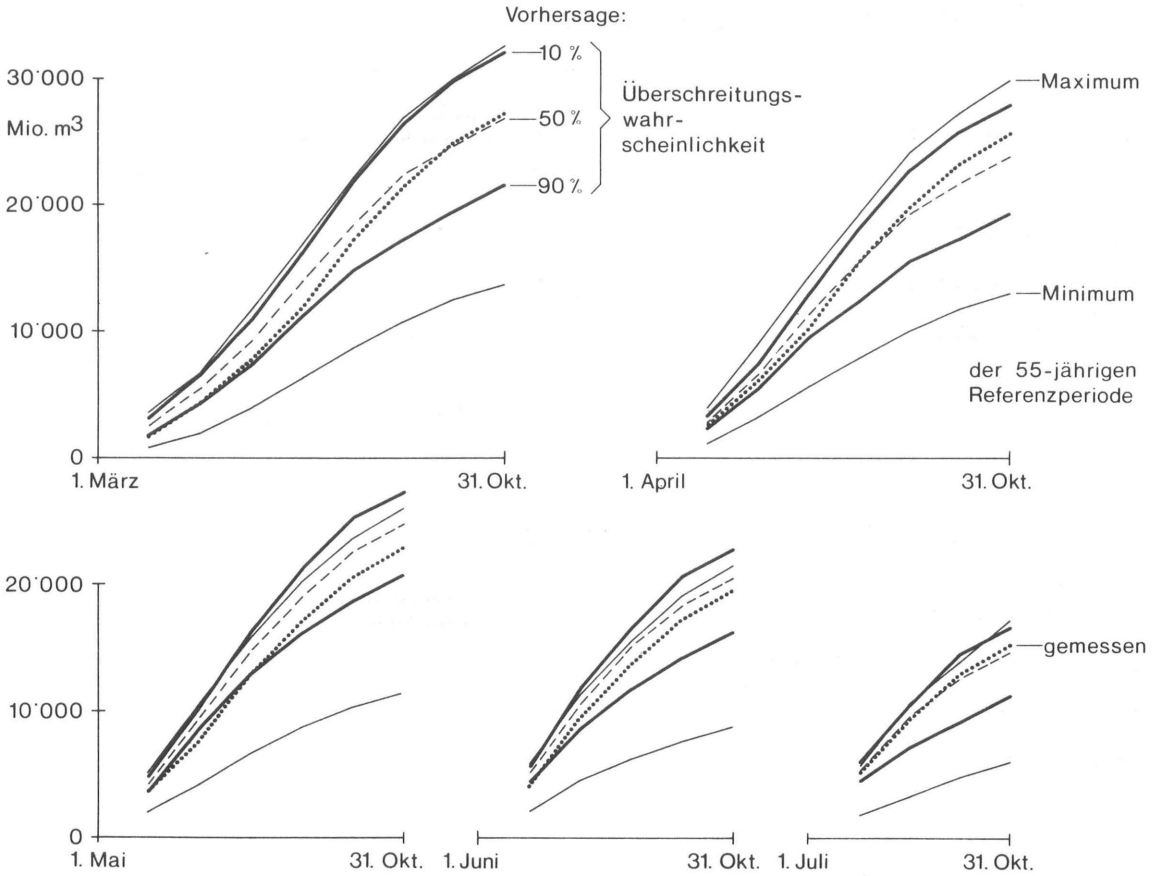


Abb. 5 Sommerabflussprognosen für den Rhein bei Rheinfelden 1975: Vorhersage und beobachtete Werte, sowie Extremwerte der Referenzperiode

3. Kurzfristprognosen

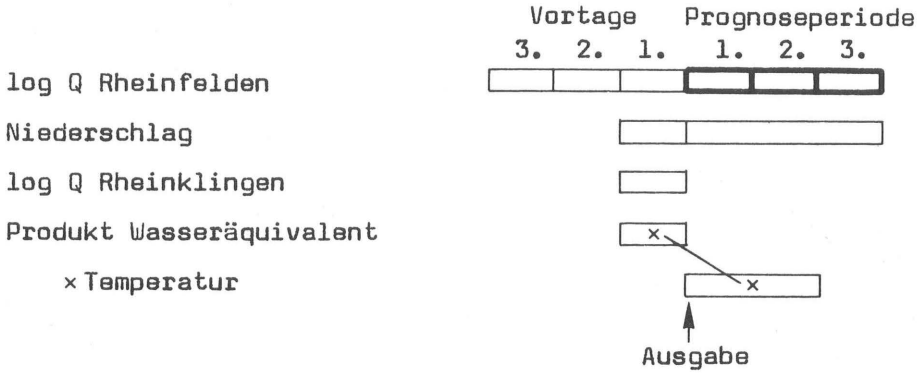
Die Kurzfristprognosen für den Rheinabfluss werden ebenfalls im Rahmen der genannten Arbeitsgruppe herausgegeben. Für einzelne Interessenten -- so die Schiffahrt -- sind sie sogar wichtiger als die Langfristprognosen.

3.1 Prognoseperioden und Prognoseformeln

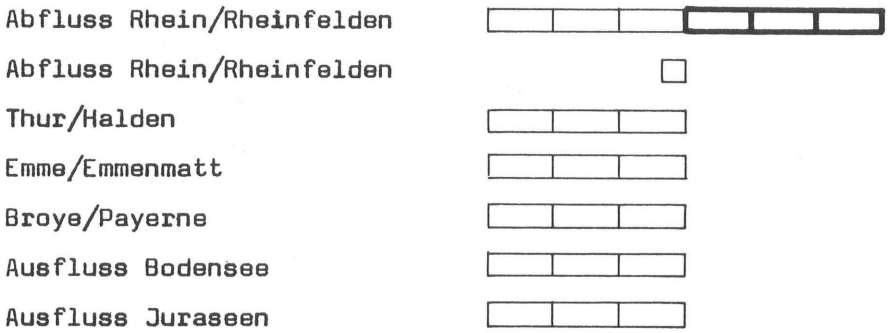
Die Kurzfristprognosen werden heute während des ganzen Jahres an drei Wochentagen, die im voraus festgesetzt sind, für mehrere Zielgrössen ermittelt: die stündlichen Abflüsse des laufenden und des Folgetages, die täglichen Abflüsse des laufenden und der beiden nächsten Folgetage, die dreitäglichen Abflüsse der entsprechenden drei Tage. Der Ausgabezeitpunkt ist für alle ca. 9.30 Uhr des ersten Tages.

Einen Einblick in die entsprechenden Gleichungen, die ebenfalls aufgrund von linearen Regressionsanalysen aufgestellt werden, vermitteln die in Abb. 6 veranschaulichten drei Beispiele:

Ausgabe bei Schneeschmelze, März/April



Ausgabe bei fallendem Ast des Hochwassers:



Ausgabe Dezember - Februar

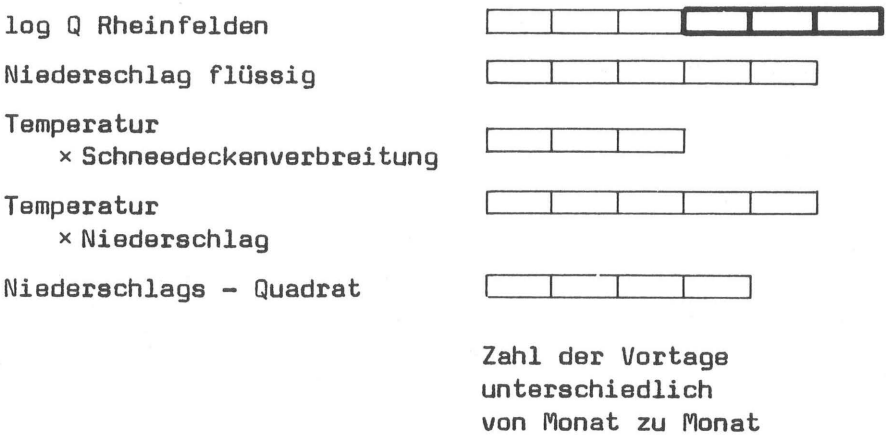


Abb. 6 Kurzfristprognosen Rhein/Rheinfelden: Einflussgrössen und Zielgrössen sowie Summationsintervalle, die zur Berechnung der Variablen verwendet werden

Beispiel 2: Prognose in den Monaten März und April bei Schneeschmelze

Zielgrösse:
- Logarithmischer Wert des Dreitagemittels der Prognoseperiode (Ausgabetag, nächster und übernächster Tag)

Einflussgrössen:
- Logarithmische Werte der Tagesmittel des Rheinabflusses in Rheinfelden an den drei Vortagen
- Logarithmischer Wert des Tagesmittels des Rheinabflusses aus dem Bodensee (Rheinklingen) am Vortag
- Niederschlag des Vortages und eine gewichtete Niederschlagsprognose für die Prognoseperiode
- Produkt des Wasseräquivalentes der Schneedecke am Vortag und der vorhergesagten Temperatur der Prognoseperiode (stellvertretend für das Schneeschmelzwasser)

Beispiel 3: Prognose bei fallendem Ast einer Hochwasserspitze

Zielgrösse:
- Tagesmittel der Abflüsse der Prognoseperiode

Einflussgrössen:
- Tagesmittel der Abflüsse an den drei Vortagen in Rheinfelden sowie bei 5 weiteren automatisierten (das heisst telefonisch abfragbaren) Abflussstationen im Mittelland
- Momentanwert des Abflusses in Rheinfelden

Beispiel 4: Prognose in den Monaten Dezember bis Februar bei leichter Schneedecke im Mittelland

Zielgrösse:
- Logarithmischer Wert der Tagesmittel der Prognoseperiode

Einflussgrössen:
- Logarithmische Werte der Tagesmittel des Rheinabflusses an den drei Vortagen
- Flüssiger Niederschlag, Tageswerte der Vortage und vorausgesagte Tageswerte des Ausgabetages und des zweiten Tages (geschätzte Anteile am Gesamtniederschlag)
- Produkt aus den Tagesmitteln der Lufttemperatur und der Ausbreitungsfläche der Schneedecke an den Vortagen (stellvertretend für das Schneeschmelzwasser)
- Produkt aus den Tagesmitteln der Lufttemperatur und der Tageswerte des Niederschlages an den Vortagen, dem Ausgabetag und dem ersten Tag (dadurch wird eine Verbesserung der Schätzung des flüssigen Anteils des Gesamtniederschlages angestrebt)
- Quadrat der Tageswerte des Niederschlages in den Vortagen und am Ausgabetag.

Wie diese Prognosegleichungen zeigen, werden einerseits Messgrössen und anderseits abgeleitete Grössen als Einflussgrössen bzw. Regressionsvariablen verwendet. Interessant sind insbesondere diejenigen Einflussgrössen, die selbst das Ergebnis einer Prognose darstellen. Es handelt sich um meteorologische Prognosen für Niederschläge und Temperaturen.

3.2 Ergebnisse

Abb. 7 stellt eine Sequenz von Prognosen dar, die im Februar 1970 herausgegeben wurden und die Tagesmittel der drei nachfolgenden Tage betreffen. Die schattierten Säulen entsprechen der Voraussage des Intervalls, das mit 80 % den Abfluss enthalten wird. Der Fuss bzw. der Kopf der Säulen liegt dort, wo die Ueberschreitungswahrscheinlichkeit zu 90 bzw. 10 % errechnet wurde. Abb. 7 enthält ebenfalls die Ganglinie der nachträglich beobachteten Abflüsse und die zugehörigen Tagesmittel (als

fette Punkte). Der Vergleich zeigt, dass die Prognosen sogar in einem Monat mit stark schwankenden Abflüssen sinnvoll sind. Interessant erscheinen insbesondere die Prognosen für die beiden Hochwasserspitzen: Bei der Spitze vom 3./4. Februar wurde sowohl der ansteigende wie der fallende Ast einigermassen zutreffend vorausgesagt, bei der Spitze vom 23. Februar dagegen nur der fallende.

In Monaten mit weniger stark schwankenden Abflüssen sind die Prognosen natürlich einfacher und folglich besser.

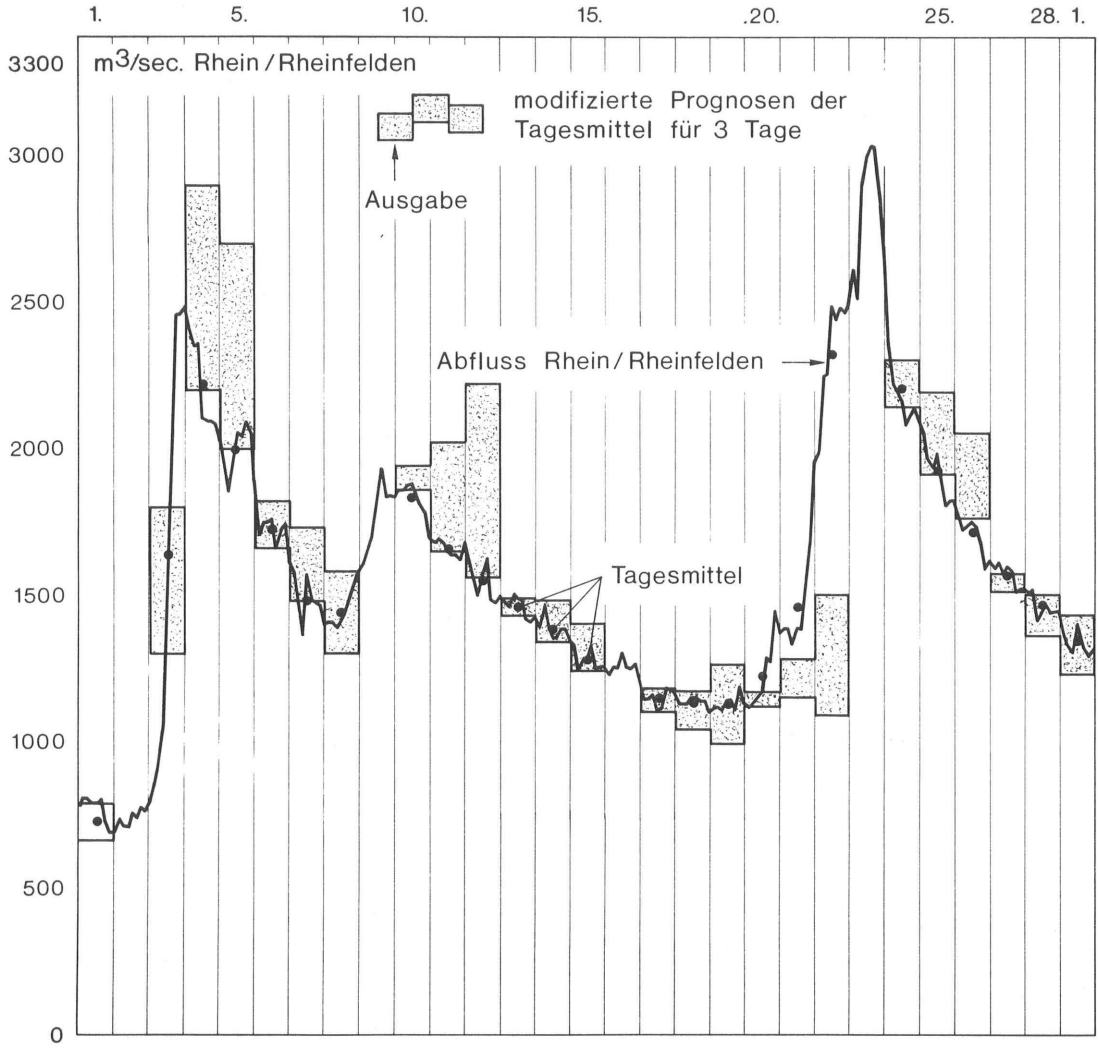


Abb. 7 Kurzfristprognosen Rhein/Rheinfelden, Ausgabe Februar 1970; beobachtete Ganglinie des Abflusses und Vorhersagen

3.3 Ausarbeitung eines neuen Modells

Zur Zeit wird für die Kurzfristprognosen an einem neuen Modell gearbeitet, das dem Flussschema von Abb. 8 entspricht. Beim jetzigen Stand der Arbeiten gehen als Messgrössen ein:

- der Abfluss von 16 automatisierten Abflussstationen

- die Pegelstände und Abflüsse des Bodensees und der Juraseen
- der Niederschlag aus einer grösseren Anzahl von Niederschlagsschreibern und Tagessammlern
- das Temperaturprofil
- die temporäre Schneegrenze
- das Wasseräquivalent der Schneedecke

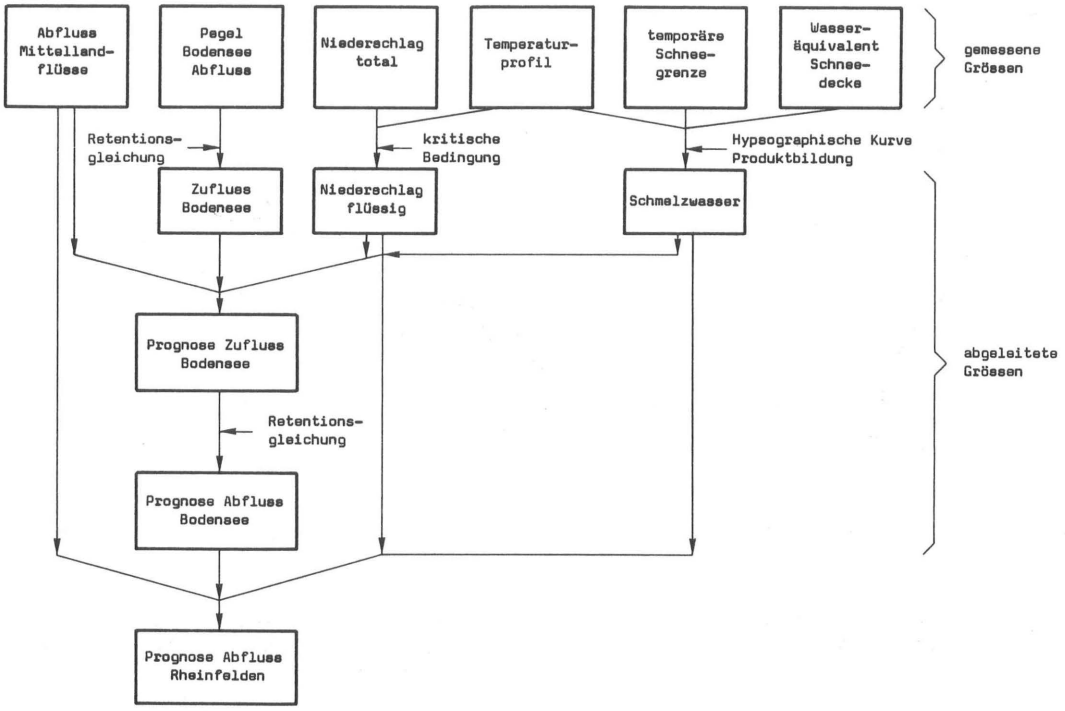


Abb. 8 Kurzfristprognosen: Abfluss Rhein/Rheinfelden, Flussdiagramm des Vorhersagemodells

Dabei wird als Temperaturprofil die Abhängigkeit der aktuellen Lufttemperatur von der Meereshöhe des Einzugsgebietes bezeichnet. Dieses Profil wird aufgrund der täglichen Temperaturmeldungen von 9 ausgewählten Stationen, die zwischen 450 und 3580 m ü.M. liegen, gemäss Abb. 9 aufgestellt.

Die temporäre Schneegrenze in m ü.M. wird nicht direkt gemessen, sondern durch eine Extrapolation, wie sie Abb. 10 veranschaulicht, geschätzt. Diese Extrapolation stützt sich auf die Schneehöhen, die einerseits in zwei ausgewählten und hochgelegenen Stationen erhoben werden und anderseits in den jeweils 4 tiefstgelegenen Stationen mit Schneebedeckung. In diese Beobachtung werden dabei rund 40 Stationen einbezogen.

Aus diesen und anderen Messgrössen werden nun einige abgeleitete Grössen ermittelt (Abb. 8):

- der Zufluss zum Bodensee
- der flüssige Niederschlag
- das Schneeschmelzwasser

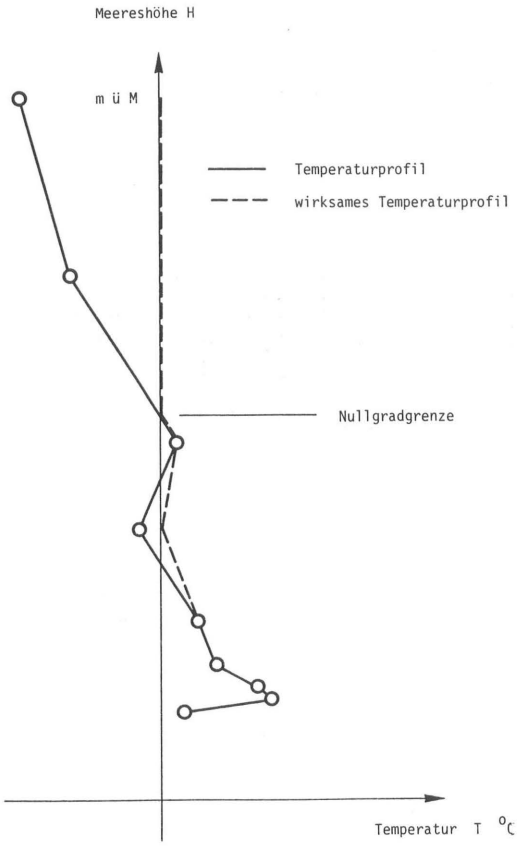


Abb. 9 Beispiel eines Temperaturprofils T(H)

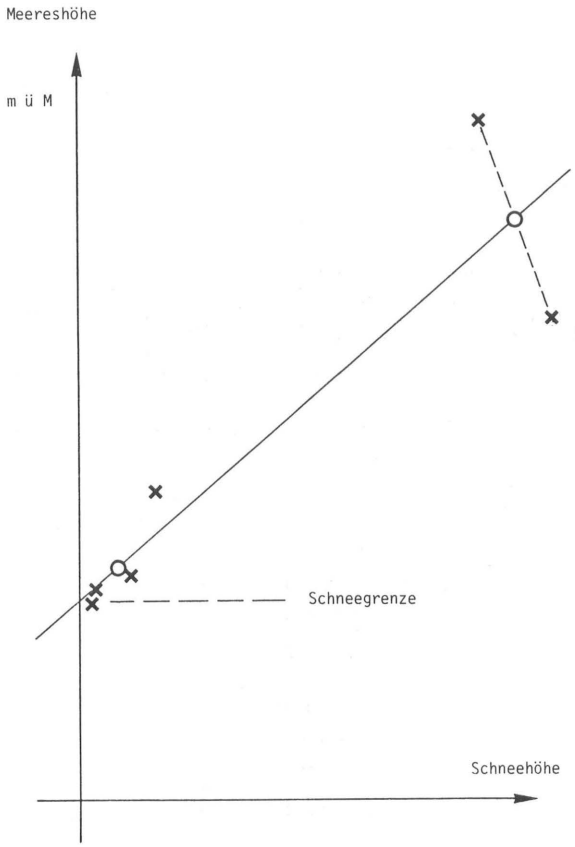


Abb. 10 Routine zur Bestimmung der temporären Schneegrenze anhand der Messungen in 6 Stationen

Der Zufluss der Vorperiode zum Bodensee wird anhand der Retentionsgleichung gleichsam rückwärts aus dem Pegelstand und dem Abfluss des Bodensees bestimmt. Der Niederschlag, der ja unmittelbar nur in seiner flüssigen Form interessiert, wird aus dem Gesamtniederschlag abgespalten; und zwar wird angenommen, dass derjenige Anteil, der bei einer Lufttemperatur von 1° C und mehr fällt, flüssig ist.

Für das Schneeschmelzwasser wird eine repräsentative Grösse ermittelt. Sie berücksichtigt einerseits die Fläche, die im Einzugsgebiet schneebedeckt ist und unterhalb der Nullgradgrenze liegt, und anderseits die dort herrschende Lufttemperatur. Und zwar stellt sie im wesentlichen das Produkt aus dieser Fläche und der Temperatur dar. Die genaue Berechnung ergibt sich aus der hypsographischen Kurve und dem Temperaturprofil als Integral gemäss Abb. 11. Bei mehrtägigen Prognoseperioden wird auch das Wasseräquivalent der Schneedecke herangezogen.

Aus diesen abgeleiteten Grössen und den gemessenen Abflüssen folgt zunächst eine Zuflussprognose zum Bodensee (Abb. 8). Mit der bereits erwähnten Retentionsgleichung lässt sich diese dann leicht in eine Abflussprognose des Bodensees transformieren, die ihrerseits zusammen mit einigen gemessenen und abgeleiteten Grössen zu der Abflussprognose des Rheins in Rheinfelden verarbeitet wird /5/.

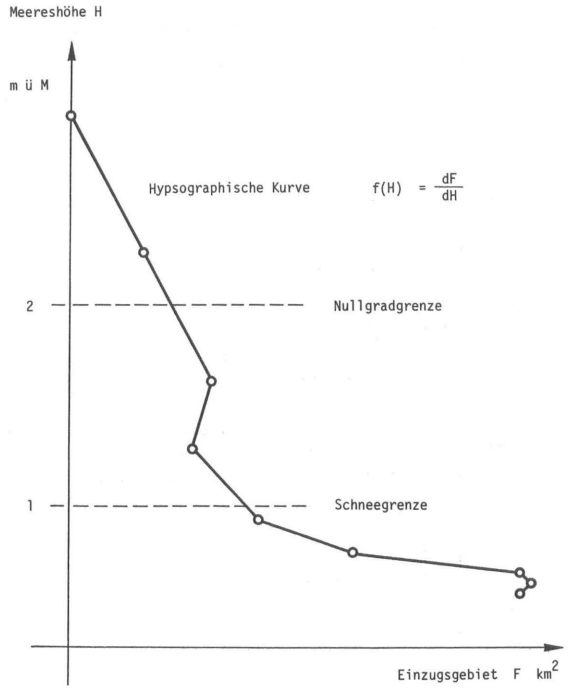


Abb. 11 Bestimmung der Schneeschmelzgrösse

$$S^{(1-2)} = \int_{H_1}^{H_2} T(H)\, f(H)\, dH$$

Dieses neue Modell für die Kurzfristprognose des Rheinabflusses in Rheinfelden berücksichtigt den Umstand, dass die Alpenrandseen des Einzugsgebietes eine gewisse Zäsur bedeuten: Denn erstens ist das Temperaturprofil nur in den alpinen und voralpinen Regionen -- also dort, wo markante Höhenunterschiede bestehen -- bestimmbar, und zweitens verunmöglichen die Seen wegen ihres nichtlinearen -- sonst aber genau bekannten -- Verhaltens eine Zusammenfassung der entsprechenden Einflussgrössen mit den übrigen, linear angenommenen Komponenten des Modells zu einem Gesamtmodell.

Das neue Modell gelangte bereits im Frühjahr 1976 in einer vorläufigen Form zur Anwendung. Parallel dazu wurden und werden die Kurzfristprognosen aber noch in der bisherigen Form (siehe Abschnitt 3) berechnet, so dass Vergleiche möglich sind.

4. Organisation des Prognosedienstes

Die Organisation für die Erstellung und Ausgabe der Kurzfristprognosen wurde von der VAW mit Unterstützung der Schweiz. Meteorologischen Zentralanstalt (MZA) und des Kraftwerkes Ryburg-Schwörstadt aufgebaut. Sie ist darauf ausgerichtet, die Partner der Arbeitsgruppe jeweils ca. um 9.30 Uhr des vereinbarten Ausgabetages zu bedienen.

Es ist evident, dass für die laufende Herausgabe solcher Prognosen nur Daten verwendet werden können, die sich laufend beschaffen und verarbeiten lassen. Der Datenfluss ist in Abb. 12 dargestellt

und mündet gleichsam in zwei Arme: in die grundsätzlich auf Messungen beruhenden hydrometeorologischen Einflussgrössen und in die vorausgesagten meteorologischen.

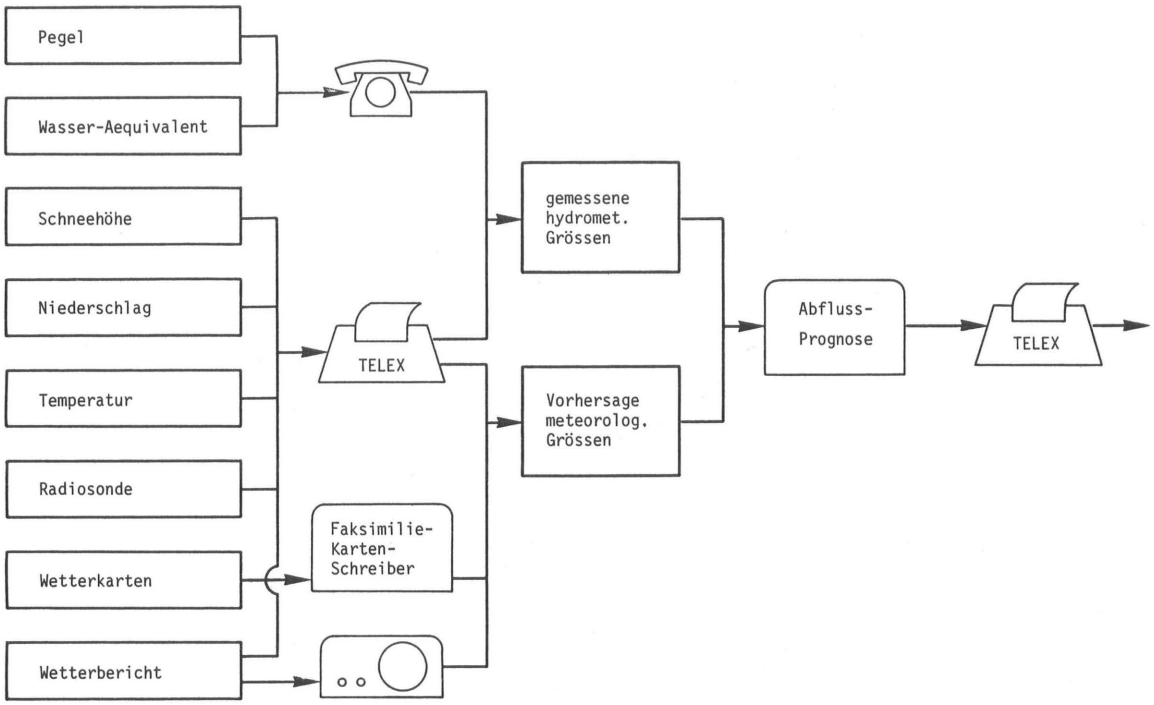


Abb. 12 Kurzfristprognosen: Abfluss Rhein/Rheinfelden, schematische Darstellung des Datenflusses

4.1 Datenfluss für hydrometeorologische Einflussgrössen

Die Uebermittlung der Messgrössen geschieht per Telefon und per Telex. Per Telefon werden von der VAW abgefragt

- beim Kraftwerk Ryburg-Schwörstadt der Rheinabfluss, der dort alle 3 Stunden ermittelt wird
- bei 6 automatischen Stationen des Eidg. Pegelnetzes die Wasserstände
- bei der Schneemessstation Wäggital der Schneewasserwert, der dort wöchentlich erhoben wird.

Per Telex, der von der MZA gesteuert wird, erhält die VAW

- von 28 Stationen die Schneehöhen
- von 11 Stationen die zweimal täglich gemessenen Niederschläge
- von 3 Stationen die dreimal täglich gemessenen Temperaturen.

Für die Berechnung der abgeleiteten Grössen steht ein programmierbarer Tischrechner vom Typ Hewlett Packard 9830 zur Verfügung. Mit seiner Hilfe wird die

- Ermittlung des Wasserwertes der Gesamtschneedecke
- Berechnung der Schneeschmelzgrösse

vorgenommen.

4.2 Datenfluss für meteorologische Einflussgrössen

Als Uebermittlungsgeräte für die vielfältigen Informationen dienen Telex, Faksimile-Kartenschreiber und Radio. Per Telex empfängt die VAW

- Angaben über den Wetterzustand und die Wetterentwicklung
- Vertikalen Zustand der Atmosphäre aufgrund des Radiosondenaufstieges der MZA in Payerne
- Wetterberichte für die Schweiz und für Deutschland

Der Faksimile-Kartenschreiber liefert eine situationsgebundene Auswahl von

- Wetterkarten mit Stationseintragungen für verschiedene Potentialflächen
- Darstellungen meteorologischer Felder: Druck, Temperatur, Feuchte, Niederschlag usw.
- Numerische Vorhersagekarten für verschiedene Potentialflächen
- Aufzeichnungen der Radiosondenaufstiege von 42 europäischen Stationen

Am Radio werden abgehört

- regionale Wetterberichte
- gewisse Stationsmeldungen
- Strassenzustandsberichte

Daraus werden Voraussagen für folgende meteorologische Einflussgrössen gemacht:

- Gebietsniederschlag sowie Anteil an flüssigem Niederschlag für 3 Tage
- Tagesmittel-Temperaturen für die Höhenschicht 300 bis 500 m ü.M. für 3 Tage
- Schneedeckenverbreitung im Einzugsgebiet.

4.3 Erstellung und Ausgabe der Prognose

Aus den beiden geschilderten Armen des Datenflusses resultieren 45 hydrometeorologische und 18 meteorologische Einflussgrössen. Sie gehen in die verschiedenen Prognosegleichungen ein, die anhand des bereits erwähnten programmierbaren Tischrechners gelöst werden. Dann erfolgt die Auswahl der Prognose, die für die gegebene Situation geeignet erscheint, und eine visuelle Beurteilung derselben durch die Sachbearbeiter. Diese bringen aufgrund ihrer Erfahrung noch allfällige Modifikationen an. Die eigentliche Ausgabe besteht in der Uebermittlung der Prognose per Telex an die Partner der Arbeitsgruppe in der Schweiz, in Frankreich, Deutschland und den Niederlanden.
Die geschilderte Erstellung und Ausgabe der Kurzfristprognosen beansprucht die Mitarbeiter der VAW wie folgt:

- am Vortag einen Meteorologen während 1/4 h
  und eine technische Hilfskraft während 3/4 h
- am Ausgabetag einen Meteorologen während 2 bis 3 h,
  eine technische Hilfskraft während 2 1/2 h und
  einen Mathematiker sporadisch.

Daraus geht u.a. hervor, dass dem Prognosedienst genügend Zeit bleibt, um die Prognosegleichungen für den Abfluss des Rheins in Rheinfelden oder für andere Stationen neu- oder weiterzuentwickeln.

Und diese Aufgabe ist nicht nur vom wissenschaftlichen Standpunkt aus äusserst interessant, sondern auch von den Bedürfnissen der nationalen und internationalen Wasserwirtschaft.

Verdankung

Der Verfasser dankt den Mitarbeitern des Prognosedienstes VAW, insbesondere H. Jensen und D. Grebner, für ihre Angaben.

Literatur

1. Van der Made, J.W.: Die Wasserbilanz im Rheingebiet. Nota W.H. 73.08, Rijkswaterstaat, Dir. Waterhuishouding en Waterbeweging, Den Haag, 1973.

2. Lugiez, F., Kasser, P., Jensen, H. et Guillot, P.: La prévision des débits du Rhin. - Bull. IAHS, XIV, 1-3/1969, p. 91 - 116 und Houille Blanche, no. 7, 1969, p. 733 - 746.

3. Jensen, H.: Anwendung der Regressionsanalyse. Hydrologische Prognosen für die Wasserwirtschaft. Mitteilung Nr. 12 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH-Z, 1974, S. 139 - 164.

4. Vischer, D.: Abflussprognosen für die Wasserwirtschaft. Wasser, Energie, Luft 5/1976, S. 112 - 118.

5. Jensen, H.: Flood routing in the catchment area of the Rhine at Basel 2ème réunion sur les problèmes d'hydrologie en Europe, Bruxelles, 1977.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. D. Vischer
Direktor der
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie
ETH-Zentrum

CH-8092 Zürich