

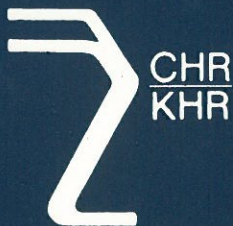
Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

**Description de modèles de prévision hydrologiques
dans le bassin du Rhin**

**Beschreibung hydrologischer Vorhersagemodelle im
Rheineinzugsgebiet**

Rapporteur: H. G. Mendel



**Rapport no. I-7 de la CHR
Bericht Nr. I-7 der KHR**

Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

Description de modèles de prévision hydrologiques
dans le bassin du Rhin

Beschreibung hydrologischer Vorhersagemodelle
im Rheineinzugsgebiet

Rapporteur: H. G. Mendel, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

Auteurs/Autoren: D. Grebner, ETH – Zürich
H. Jensen, ETH – Zürich
H.-J. Liebscher, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
J. C. Maihlol et al., CEMAGREF, Lyon et Service Régional de
l'Aménagement des Eaux d'Alsace, Colmar
H. G. Mendel, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
J. G. de Ronde, Rijkswaterstaat, Den Haag
X. Roederer, Service de la navigation de Nancy
G. Ruban, Service de la navigation de Strasbourg
K. Wilke, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz



Secretariaat CHR|KHR
Maerlant 4-6

Postbus 17
8200 AA Lelystad
Pays-Bas|Niederlande

Rapport no. I-7 de la CHR
Bericht Nr. I-7 der KHR

Langues originales: français, allemand
et néerlandais

Originalsprachen: französisch, deutsch
und niederländisch

© 1988, CHR/KHR
ISBN 90-70980-06-1

Beschrijving van hydrologische voorspellingsmodellen in het Rijngebied

Nederlandstalige gedeelten:

Samenvatting: blz. 113

Bijzonderheden CHR: blz. 134

Description of hydrological forecasting models in the Rhine basin

English texts:

Summary: p. 113

Particulars CHR: p. 134

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Description

Description de modèles de prévision hydrologiques dans le bassin du Rhin = Beschreibung hydrologischer Vorhersagemodelle im Rheineinzugsgebiet / Rapporteur: H. G. Mendel ; auteurs/Autoren: D. Grebner ... [et al.]
– Lelystad : CHR/KHR. – Ill., graf., tab. – (Rapport de la CHR = Bericht der KHR ; no. I-7)
Tekst in het Frans en Duits. – Met lit. opg. – Met samenvattingen in het Nederlands en Engels.

ISBN 90-70980-06-1

SISO 568.2 UDC 556.53(282.243.1)

Trefw.: hydrologie ; Rijn.

Préface

La Décennie Hydrologique Internationale (DHI), conduite par l'Unesco au cours des années 1965 à 1974, comptait parmi les objectifs principaux de son programme, celui d'améliorer la coopération internationale à l'échelle régionale, dans le domaine de l'hydrologie. Dans le cadre de ce programme de la DHI, les comités nationaux des Etats riverains du Rhin ont fondé en 1970 la «Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin» (CHR). En 1975, les travaux de la Commission ont été poursuivis dans le cadre du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO et du Programme d'Hydrologie Opérationnelle (PHO) de l'OMM. Le premier résultat des travaux de la CHR a été la publication d'un ouvrage monumental, la «Monographie hydrologique», en 1978. Depuis, la CHR s'est consacrée à un choix de questions hydrologiques, et par dessus tout à l'amélioration progressive des échanges d'informations et de données au travers des frontières entre Etats participants. A la fin de ce rapport on trouve quelques informations sur les activités de la CHR et ses travaux courants, sous forme d'un résumé (p. 132).

Un des projets de la CHR, mis sur pied dans ce sens, a été consacré aux problèmes liés à la prévision hydrologique. A cet effet, un groupe de concertation «Prévisions Hydrologiques» a été constitué, ayant comme mission de dresser un rapport sur quelques projets partiels dont les plus importants sont:

- prévisions quantitatives des précipitations;
- élaboration de propositions sur le flux de données et d'informations en vue de prévisions au-delà des frontières;
- présentation de tous les modèles de prévision des hauteurs d'eau et des débits dans le bassin du Rhin et description des méthodes utilisées.

Un rapport sur le premier sujet a été publié en 1982 (rapport I-1 de la CHR).

En ce qui concerne le dernier point, le groupe de concertation a décidé, lors de sa première session, tenue à Coblenz le 9 novembre 1978, de rédiger un inventaire des modèles de prévision, opérationnels et en préparation, dans le bassin du Rhin. A cet effet M. Dr. H.G. Mendel a été désigné comme rapporteur. Quand le projet de rapport a été presque achevé, il est apparu que les méthodes déjà décrites ont été améliorées où étaient en train d'être améliorées dans divers pays. Cela a nécessité une révision profonde du rapport, qui ne pouvait être réalisé qu'après l'établissement des descriptions des nouveaux modèles. En ce qui concerne l'affluent le plus grand du Rhin, la Moselle, il n'a pas encore été possible de remplacer l'ancien modèle, peu fiable. Par conséquent, le présent rapport ne contient pour la Moselle

Vorwort

Ein Schwerpunkt des Programms der in den Jahren 1965 bis 1974 von der Unesco durchgeführten Hydrologischen Dekade (IHD) galt der Verbesserung der regionalen internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Hydrologie. Im Rahmen dieses IHD-Programms wurde im Jahre 1970 von den nationalen Komitees der Rheinanliegerstaaten die »Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes« (KHR) gegründet. Im Jahre 1975 wurden die Arbeiten der Kommission im Rahmen des Internationalen Hydrologischen Programms (IHP) der UNESCO und des Operationellen Hydrologischen Programms (OHP) der WMO fortgesetzt. Als erstes Ergebnis der Arbeiten der KHR wurde im Jahre 1978 eine umfangreiche hydrologische Monographie veröffentlicht; seitdem hat sich die KHR ausgewählten hydrologischen Problemen gewidmet, um vor allem den Informations- und Datenaustausch über die Landesgrenzen der mitarbeitenden Länder hinweg zu verbessern. Am Schluß dieses Berichtes sind einige nähere Informationen über die KHR und ihre laufenden Tätigkeiten in Kurzfassung aufgenommen (S. 132).

Eines der Projekte der KHR widmet sich dem Problemkreis der hydrologischen Vorhersagen. Es wurde daher eine Kontaktgruppe »Hydrologische Vorhersagen« eingerichtet, mit dem Auftrag, einen Bericht über einige Teilprojekte anzufertigen, von denen die wichtigsten sind:

- quantitative Niederschlagsvorhersagen;
- Erarbeitung von Vorschlägen über Daten- und Informationsfluß für länderübergreifende Vorhersagen;
- Zusammenstellung aller Wasserstands- und Abflussvorhersagemodelle im Rheingebiet, einschließlich einer Beschreibung der angewandten Methoden.

Über das erste Thema wurde im Jahre 1982 ein KHR-Bericht veröffentlicht (Bericht I-1).

Zum letzten Projekt hat die Kontaktgruppe auf ihrer ersten Sitzung am 9. November 1978 in Koblenz beschlossen, eine Übersicht der im Rheingebiet angewandten und in Vorbereitung befindlichen Vorhersagemodelle zu erstellen. Dazu wurde Dr. H.G. Mendel als Berichtersteller benannt. Als der Konzept-Bericht über dieses Thema nahezu fertiggestellt war, ergab sich, daß in verschiedenen Ländern die bereits beschriebenen Methoden verbessert worden waren, oder daß man an Verbesserungen arbeitete. Dies veranlaßte zu einer durchgreifenden Überarbeitung des Konzept-Berichtes, welche erst nach Fertigstellung der neuen Modellbeschreibungen durchgeführt werden konnte. Für den größten Seitenfluß des Rheins, die Mosel, war ein Ersatz des alten, sich als unzuverlässig erwiesenen, Modells

qu'une description du projet de nouveaux modèles, dont l'élaboration ultérieure ne pourra pourtant pas être achevée dans un avenir proche. En prenant la décision d'attendre l'achèvement de ce modèle-ci, on aurait alors risqué de devoir réviser un autre des modèles. Cette considération, ainsi que l'utilité pour tous d'une présentation des progrès considérables atteints à cet égard dans le bassin du Rhin, n'autorisait plus aucun retard à la publication du rapport.

Le présent rapport, le septième dans la série I des publications de la CHR, comprend donc l'inventaire des modèles, dans leur état d'élaboration en 1988, comme le souhaitait le groupe de concertation.

Une liste des rapports publiés jusqu'à présent, y compris ceux dans la série II (qui sont publiés sous la responsabilité des auteurs), se trouve en page 131.

J. van Malde
Président de la CHR

noch nicht möglich. Somit enthält dieser Bericht, was die Mosel anbetrifft, nur eine Beschreibung des vorgesehenen Aufbaues neuer Modelle, wovon die nähere Ausarbeitung sicher nicht in absehbarer Frist verwirklicht werden kann. Hätte man sich entschieden, auf Vollendung der Modellerstellung zu warten, so wäre bis dahin vielleicht eines der anderen Modelle überarbeitungsreif. Diese Gegebenheit sowie der Nutzen, sowohl für Betroffenen als auch für Interessenten, einer Darstellung der innerhalb des Rheingebietes erreichten erheblichen Fortschritte in diesem Bereich, ließen keinen weiteren Aufschub der Veröffentlichung des Berichtes zu.

Der vorliegende Bericht, die siebente Publikation in der Reihe I der KHR-Veröffentlichungen, umfaßt also die von der Kontaktgruppe bezweckte Übersicht nach dem Stand der Bearbeitung im Jahre 1988.

Eine Liste aller bisher erschienenen KHR-Berichte, worunter auch die der 2. Reihe (für deren Inhalt allein die Autoren verantwortlich zeichnen), findet der Leser auf Seite 131.

J. van Malde
Vorsitzender der KHR

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Préface</i>	3
1	Introduction	13
Fig. 1.1	Proposition de la CHR pour la coopération internationale en ce qui concerne la prévision des débits et des niveaux d'eau dans le bassin du Rhin	15
2	Questionnaire	17
Tabl. 2.1	Inventaire des prévisions opérationnelles de niveaux d'eau et de débits dans le bassin du Rhin	18
3	Historique des prévisions des hauteurs d'eau et des débits dans le bassin du Rhin	23
3.1	Introduction	23
3.2	Développement historique des prévisions des hauteurs d'eau et des débits dans le bassin du Rhin	23
3.3	Les prévisions actuelles des hauteurs d'eau et des débits dans le bassin du Rhin	27
4	Conditions météorologiques correspondant aux exemples des crues d'août 1978 et de février 1980	30
Fig. 4.1	Température journalière moyenne et hauteurs des précipitations sur 12 heures, du 1.1. au 9.2.1980, représentées pour 6 stations	31
Fig. 4.2	Hauteurs de la neige, température journalière moyenne et hauteurs de précipitations sur 12 heures; moyenne des pointes des rafales et vitesse moyenne du vent pour la station de la Dôle	32
5	Description et utilisation des modèles de prévision	34
5.1	RHEINFELDEN	34
5.1.1	Description du modèle, état de la question en 1987	34
5.1.1.1	Prévision à court terme	34
Fig. 5.1.1	Hydrogramme de la crue du Rhin à Rheinfelden du mois d'août 1978	34
Fig. 5.1.2	Circulation de l'information et parc du matériel mis en oeuvre pour l'édition opérationnelle des prévisions à court terme du débit du Rhin à Rheinfelden	36
Fig. 5.1.3	Réseau hydrographique du modèle de prévision	37
5.1.1.2	Prévision à long terme	40
5.1.2	Les crues d'août 1978 et de février 1980 comme exemples d'utilisation	41
Fig. 5.1.4	Rhin/Rheinfelden: crue d'août 1978	42
Fig. 5.1.5	Rhin/Rheinfelden: crue de février 1980	43
Fig. 5.1.6	Rhin/Rheinfelden: crue de février 1980	44
Fig. 5.1.7	Prévision: précipitations et fonte de neige accumulées; observé: précipitations et fonte de neige calculée approximativement	46
5.2	ILL	48
5.2.1	Introduction	48
5.2.2	L'élaboration du modèle	48
5.2.3	Le modèle «pluie-(neige)-débit» de la prévision des débits de l'Ill à Colmar	49
Fig. 5.2.1	Prise en compte du régime nival avec un seul module régi par un seul poste thermométrique	50
Fig. 5.2.2	Séparation du Modèle CREC (fonte de neige) en deux modules parallèles	51
Fig. 5.2.3	Simulation sans prise en compte du régime nival	52
Fig. 5.2.4	Simulation avec prise en compte du régime nival	53
Fig. 5.2.5	Evolution du stock neigeux (équivalent en eau)	54
5.2.4	La prévision des débits de l'Ill à Colmar à 18 heures	55
5.2.5	Résultats du modèle	56
Fig. 5.2.6	Prévision à Colmar (délai 18 heures)	58
Fig. 5.2.7	L'Ill à Colmar-Ladhof (crue de mai 1983); prévision à 18 heures sans la «Pluie»	59
Fig. 5.2.8	L'Ill à Colmar-Ladhof (crue de mai 1983); prévision à 18 heures avec la «Pluie»	60
5.2.6	Conclusion	61
5.3	MOSELLE	62
5.3.1	Etudes antérieures	62
Fig. 5.3.1	Points de prévision pour les modèles de prévision des crues dans le bassin de la Moselle française	63
5.3.2	Etudes nouvelles	62

5.4	SARRE	65
5.4.1	Modèle de prévision des débits de crue sur la Sarre	65
5.4.1.1	Principes généraux	65
Tabl. 5.4.1	Stations de mesure nécessaires au système de prévision	67
Fig. 5.4.1	Réseau d'annonce et de prévision des crues de la Sarre	66
5.4.1.2	Résultats mathématiques	67
Tabl. 5.4.2	Bilan des stations de prévision	68
5.4.1.3	Fonctionnement	67
5.4.2	Résultats de la prévision du 24 au 31 mai 1983	69
5.4.2.1	Résumé de la méthode	69
5.4.2.2	Résultats	69
Fig. 5.4.2	Résultats des calculs de la prévision à 6h à la station de Sarreinsming	70
5.5	MODÈLE À CANAUX MULTIPLES DE FILTRAGE (MKF)	71
5.5.1	Description du modèle à canaux multiples de filtrage pour la prévision des niveaux et des débits	71
5.5.1.1	Vue d'ensemble	71
5.5.1.2	Le modèle MKF	72
5.5.1.3	Données nécessaires au modèle MKF	74
Fig. 5.5.1	Les stations utilisées pour le modèle de prévision MKF	75
5.5.2	La prévision opérationnelle	76
5.5.2.1	Calcul et transfert des prévisions	76
5.5.2.2	Données erronées et stations en panne	77
5.5.2.3	Exemples des prévisions opérationnelles	78
Fig. 5.5.2	Prévision effective des hauteurs d'eau à la station limnimétrique de Speyer/Rhin	79
Fig. 5.5.3	Prévision effective des hauteurs d'eau à la station limnimétrique de Coblenze/Rhin	80
Fig. 5.5.4	Prévision effective des hauteurs d'eau à la station limnimétrique de Wesel/Rhin	81
5.5.2.4	Utilisation des prévisions établies au moyen de modèle à canaux multiples de filtrage	82
5.5.3	La crue de février 1980	83
Fig. 5.5.5	Prévision effective des hauteurs d'eau à la station limnimétrique de Coblenze/Rhin	84
Fig. 5.5.6	Prévisions des hauteurs d'eau à intervalles de 6 heures	85
5.5.4	Application du modèle MKF aux bassins de la Moselle et de la Sarre	83
5.6	RHEINA	86
5.6.1	Prévision des débits pour les stations limnimétriques du Haut Rhin par l'Institut fédéral d'Hydrologie avec le modèle RHEINA, un modèle déterministe pluie-débit	86
5.6.1.1	Vue d'ensemble	86
Fig. 5.6.1	Prévision du débit de crue de mai 1983 selon RHEINA	87
5.6.1.2	Le modèle RHEINA	86
5.6.1.2.a	Les processus pluie-débit	86
Tabl. 5.6.1	Méthodes de calcul utilisées dans le modèle RHEINA pour déterminer les processus pluie-débit	88
5.6.1.2.b	Subdivision du bassin hydrographique en vue du calcul numérique	88
Fig. 5.6.2	Subdivision calculée du bassin du Rhin	89
5.6.1.2.c	Programme de calcul	88
Fig. 5.6.3	Organigramme RHEINA	91
5.6.1.2.d	Commande de paramètres	90
5.6.1.3	Données	92
5.6.1.3.a	Le réseau de stations pour l'obtention des données effectives	92
Tabl. 5.6.2	Données d'exploitation du modèle RHEINA	94
Fig. 5.6.4	Stations de mesure utilisées pour la prévision opérationnelle RHEINA	93
5.6.1.3.b	Données de calibrage et paramètres du modèle	92
5.6.1.3.c	Données d'exploitation	96
5.6.1.4	La prévision opérationnelle	96
5.6.2	Prévision de la crue de mai 1983 d'après le modèle RHEINA	98
5.7	Prévision des débits pour LOBITH	99
5.7.1	Description des modèles de prévision	99
5.7.1.1	Introduction	99
5.7.1.2	Le modèle empirique	99
Fig. 5.7.1	Stations utilisées pour le modèle empirique	100

5.7.1.3	Le modèle stochastique	. . . . .	101
Tabl. 5.7.1	Ecart types »S« et écarts maximaux »max« (en cm) des différents modèles partant des hauteurs d'eau »H« ou des débits »Q«	. . . . .	104
Fig. 5.7.2	Stations utilisées pour le modèle stochastique	. . . . .	103
Fig. 5.7.3	Prévision à 2 jours d'échéance	. . . . .	105
Fig. 5.7.4	Prévisions au moyen du modèle B: $Q + P; H > 10,70$ m	. . . . .	107
5.7.2	Prévision de l'onde de crue de février 1980	. . . . .	106
Fig. 5.7.5-5.7.8	Pointe de crue du 9 février 1980 à Lobith	. . . . .	108
Fig. 5.7.9	Prévisions du 7 février pour les 8, 9, 10 et 11 février 1980	. . . . .	109
6	Résumé (français, allemand, néerlandais et anglais)	. . . . .	110
	Bibliographie	. . . . .	117
	Annexes		
Annexe I	Carte géographique du bassin du Rhin	. . . . .	122
Annexe II	Tableau du groupe de travail RA-VI de l'OMM	. . . . .	125
	Publications de la CHR	. . . . .	131
	Quelques informations sur la CHR (français, allemand, néerlandais, anglais)	. . . . .	132

INHALTSVERZEICHNIS

	<i>Vorwort</i>	3
1	Einleitung	13
Abb. 1.1	Vorschlag der KHR für die internationale Zusammenarbeit bei der Wasserstands- und Abflußvorhersage im Rheingebiet	15
2	Fragebogen	17
Tab. 2.1	Erfassung operationeller Wasserstands- und Abflußvorhersagen im Rheingebiet	20
3	Historische Entwicklung der Wasserstands- und Abflußvorhersagen im Rheingebiet	23
3.1	Einleitung	23
3.2	Historische Entwicklung der Wasserstands- und Abflußvorhersagen im Rheingebiet	23
3.3	Die heutigen Wasserstands- und Abflußvorhersagen im Rheingebiet	27
4	Meteorologische Verhältnisse zu den Hochwasserbeispielen vom August 1978 und Februar 1980	30
Abb. 4.1	Tagesmitteltemperatur und 12-stündige Niederschlagssummen, vom 1.1. bis 9.2.1980, dargestellt für 6 Stationen	31
Abb. 4.2	Verlauf der Schneehöhe, Tagesmitteltemperatur und 12-stündige Niederschlagssummen; Mittel über die stündlich größten Böenspitzen und Mittel der Windgeschwindigkeit für die Meßstation La Dôle	32
5	Beschreibung der Vorhersagemodelle und ihre Anwendung	34
5.1	RHEINFELDEN	34
5.1.1	Modellbeschreibung, Stand 1987	34
5.1.1.1	Kurzfristvorhersagen	34
Abb. 5.1.1	Hochwasservorhersage vom August 1978 bei Rheinfelden	34
Abb. 5.1.2	Informationsfluß und Geräte bei der Ausgabe kurzfristiger Abflußvorhersagen für den Rhein bei Rheinfelden	36
Abb. 5.1.3	Gewässernetz des Vorhersagemodell	37
5.1.1.2	Langfristprognosen	40
5.1.2	Die Hochwasserereignisse vom August 1978 und Februar 1980 als Anwendungsbeispiele	41
Abb. 5.1.4	Rhein/Rheinfelden: Hochwasser August 1978	42
Abb. 5.1.5	Rhein/Rheinfelden: Hochwasser Februar 1980	43
Abb. 5.1.6	Rhein/Rheinfelden: Hochwasser Februar 1980	44
Abb. 5.1.7	Prognose: Niederschlag und Schmelzwasser akkumuliert; Beobachtet: Niederschlag und näherungsweise berechnete Schneeschmelze	46
5.2	ILL	48
5.2.1	Einleitung	48
5.2.2	Modellentwicklung	48
5.2.3	Das »Niederschlag-Abfluß«-Modell zur Abflußvorhersage der Ill am Pegel Colmar	49
Abb. 5.2.1	Berücksichtigung der Schneeschmelze aufgrund eines einzigen Moduls mit den Daten an nur einer Temperatur-Meßstation	50
Abb. 5.2.2	Trennung des CREC-Modells (Schneeschmelze) in zwei parallele Modulen	51
Abb. 5.2.3	Simulation ohne Berücksichtigung der Schneeschmelze	52
Abb. 5.2.4	Simulation mit Berücksichtigung der Schneeschmelze	53
Abb. 5.2.5	Entwicklung des Schneevorrates (Wasseräquivalent)	54
5.2.4	Die Abflußvorhersage für die Ill am Pegel Colmar mit einer Vorhersagefrist von 18 Stunden	55
5.2.5	Ergebnisse des Modells	56
Abb. 5.2.6	Vorhersage am Pegel Colmar (Frist von 18 Stunden)	58
Abb. 5.2.7	Die Ill am Pegel Colmar-Ladhof (Hochwasser Mai 1983); Vorhersage für 18 Stunden ohne »Niederschlag«	59
Abb. 5.2.8	Die Ill am Pegel Colmar-Ladhof (Hochwasser Mai 1983); Vorhersage für 18 Stunden mit »Niederschlag«	60
5.2.6	Schlußfolgerung	61
5.3	MOSEL	62
5.3.1	Zurückliegende Arbeiten	62
Abb. 5.3.1	Vorhersagepegel für die Hochwasservorhersagemodelle im Einzugsgebiet der französischen Mosel	63
5.3.2	Neue Modellarbeiten	62

5.4	SAAR	65
5.4.1	Modell zur Vorhersage der Hochwasserabflüsse an der Saar	65
5.4.1.1	Allgemeine Grundlagen	65
Tab. 5.4.1	Meßstationen für das Vorhersagesystem	67
Abb. 5.4.1	Hochwasservorhersage- und Meldungsnetz für die Saar	66
5.4.1.2	Mathematische Ergebnisse	67
Tab. 5.4.2	Bilanz der Vorhersagestationen	68
5.4.1.3	Betrieb	67
5.4.2	Ergebnisse der Vorhersage des Hochwassers vom 24. bis 31. Mai 1983	69
5.4.2.1	Zusammenfassung der Methode	69
5.4.2.2	Ergebnisse	69
Abb. 5.4.2	Ergebnisse der Vorhersageberechnungen für 6 Stunden bei Sarreinsming	70
5.5	MEHRKANALFILTERMODELL (MKF)	71
5.5.1	Modellbeschreibung der Mehrkanalfilterung zur Wasserstands- und Abfluvorhersage	71
5.5.1.1	Überblick	71
5.5.1.2	Das Modell MKF	72
5.5.1.3	Daten für das Modell MKF	74
Abb. 5.5.1	Benutzte Pegel für das Vorhersagemodell MKF	75
5.5.2	Die operationelle Vorhersage	76
5.5.2.1	Berechnung und Weitergabe der Vorhersagen	76
5.5.2.2	Fehlerhafte Daten und Stationsausfall	77
5.5.2.3	Beispiele operationeller Vorhersagen	78
Abb. 5.5.2	Aktuelle Wasserstandsvorhersage am Pegel Speyer/Rhein	79
Abb. 5.5.3	Aktuelle Wasserstandsvorhersage am Pegel Koblenz/Rhein	80
Abb. 5.5.4	Aktuelle Wasserstandsvorhersage am Pegel Wesel/Rhein	81
5.5.2.4	Nutzung der mit dem Mehrkanalfiltermodell erstellten Vorhersagen	82
5.5.3	Das Hochwasser vom Februar 1980	83
Abb. 5.5.5	Aktuelle Wasserstandsvorhersage am Pegel Koblenz/Rhein	84
Abb. 5.5.6	6-Stündliche Wasserstandsvorhersagen	85
5.5.4	Anwendung des MKF-Modells an das Mosel- und Saargebiet	83
5.6	RHEINA	86
5.6.1	Abfluvorhersage der Bundesanstalt für Gewässerkunde für Pegel am Oberrhein nach dem deterministischen Niederschlag-Abfluß-Modell RHEINA	86
5.6.1.1	Überblick	86
Abb. 5.6.1	Abfluvorhersage des Hochwassers vom Mai 1983 nach RHEINA	87
5.6.1.2	Das Modell RHEINA	86
5.6.1.2.a	Die Abflußprozesse	86
Tab. 5.6.1	Im Modell RHEINA benutzte Methoden zur Berechnung des Niederschlag-Abfluß-Prozesses	88
5.6.1.2.b	Die rechen-technische Aufgliederung des Einzugsgebietes	88
Abb. 5.6.2	Rechen-technische Einteilung des Rheingebietes	89
5.6.1.2.c	Das Rechenprogramm	88
Abb. 5.6.3	Flußdiagramm RHEINA	91
5.6.1.2.d	Parametersteuerung	90
5.6.1.3	Daten	92
5.6.1.3.a	Das Stationsnetz für aktuelle Daten	92
Tab. 5.6.2	RHEINA-Betriebsdaten	95
Abb. 5.6.4	Für die operationelle RHEINA-Vorhersage benutzte Meßstationen	93
5.6.1.3.b	Eichdaten und Modellparameter	92
5.6.1.3.c	Betriebsdaten	96
5.6.1.4	Die operationelle Vorhersage	96
5.6.2	Die Vorhersage des Hochwassers vom Mai 1983 nach dem Modell RHEINA	98
5.7	Abfluvorhersage LOBITH	99
5.7.1	Beschreibung der Vorhersagemodelle	99
5.7.1.1	Einleitung	99
5.7.1.2	Das empirische Modell	99
Abb. 5.7.1	Für das empirische Modell angewandte Pegel	100

5.7.1.3	Das stochastische Modell	101
Tab. 5.7.1	Standardabweichung »S« und Höchstabweichung »max« (in cm) der verschiedenen Modelle die von Wasserständen »H« oder von Abflüssen »Q« ausgehen	104
Abb. 5.7.2	Für das stochastische Modell angewandte Pegel	103
Abb. 5.7.3	Vorhersage 2 Tage im voraus	105
Abb. 5.7.4	Vorhersagen mit Modell B: $Q + P; H > 10,70$ m	107
5.7.2	Vorhersage der Hochwasserwelle vom Februar 1980	106
Abb. 5.7.5-5.7.8	Hochwasserspitze 9. Februar 1980 bei Lobith	108
Abb. 5.7.9	Vorhersage am 7. Februar für den 8., 9., 10. und 11. Februar 1980	109
6	Zusammenfassung (französisch, deutsch, niederländisch und englisch)	110
	Literaturverzeichnis	117
	Anlagen	
Anlage I	Geographische Karte des Rheineinzugsgebietes	122
Anlage II	Tabelle der hydrologischen Arbeitsgruppe RA-VI der WMO	125
	KHR-Veröffentlichungen	131
	Einige Informationen über die KHR (französisch, deutsch, niederländisch und englisch)	132

1. INTRODUCTION

Le présent rapport remonte à une décision prise lors de la première session du groupe de concertation »Prévisions Hydrologiques«, suivant laquelle, comme complément aux descriptions des modèles dans la Monographie, l'état des prévisions opérationnelles, les modèles en préparation ainsi que les possibilités d'amélioration devraient être repris et résumés également sous la forme d'un tableau d'ensemble.

Entre temps, tous les modèles ont été développés en vue d'une utilisation pratique, ou ont été vérifiés et utilisés opérationnellement. En outre, le nombre des modèles a augmenté de 6 à 7 avec l'achèvement du modèle à filtrage multicanaux (MKF) de l'Institut fédéral de l'Hydrologie.

Par conséquent, les modèles suivants sont opérationnels ou en passe de le devenir:

RHEINFELDEN,	Institut de Géographie de l'EPF-Zürich et Service hydrologique et géologique national, Berne, Suisse;
ILL,	Service Régional de l'Aménagement des Eaux d'Alsace, Colmar, France;
MOSELLE,	Service de la navigation de Nancy, France;
SARRE,	Service de la navigation de Strasbourg, France;
MKF,	Institut fédéral de l'Hydrologie, Coblenz, République fédérale d'Allemagne;
RHEINA,	Institut fédéral de l'Hydrologie, Coblenz, République fédérale d'Allemagne;
LOBITH,	Rijkswaterstaat, Lelystad, Pays-Bas.

Le modèle déterministe et stochastique de RHEINFELDEN réalise un temps de prévision de 2 à 3 jours, en tenant compte de la fonte de la neige et des prévisions quantitatives des précipitations.

Les modèles français ILL et SARRE ont été testés et sont actuellement dans une phase quasi-opérationnelle. Ces modèles sont du type à régression multiple, utilisant surtout des données de débits. Par conséquent, le temps de prévision est limité à 24 heures.

Les modèles pour la MOSELLE sont en train d'être remaniés et ne sont pas opérationnels encore. Les nouveaux modèles seront du type stochastique autorégressif.

1. EINLEITUNG

Der vorliegende Bericht geht auf einen Beschluß der ersten Sitzung der Kontaktgruppe »Hydrologische Vorhersagen« zurück, wonach im Anschluß an die Modellbeschreibungen der Monographie auch in Form einer Tabelle der Stand der operationellen Vorhersagen, die in Vorbereitung befindlichen Modelle sowie weitere Verbesserungsmöglichkeiten zusammengefaßt werden sollen.

Alle Modelle wurden inzwischen für den praktischen Einsatz weiter vorbereitet oder operationell erprobt und eingesetzt. Darüberhinaus hat sich die Zahl der Modelle durch die Fertigstellung des Mehrkanalfiltermodells (MKF) der Bundesanstalt für Gewässerkunde von 6 auf 7 erhöht.

Danach befinden sich gegenwärtig folgende Modelle im operationellen Einsatz oder in der Vorbereitung zum operationellen Einsatz:

RHEINFELDEN,	Geographisches Institut der ETH-Zürich und Landeshydrologie und -geologie, Bern, Schweiz;
ILL,	Service Régional de l'Aménagement des Eaux d'Alsace, Colmar, Frankreich;
MOSEL,	Service de la navigation de Nancy, Frankreich;
SAAR,	Service de la navigation de Strasbourg, Frankreich;
MKF,	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Bundesrepublik Deutschland;
RHEINA,	Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Bundesrepublik Deutschland;
LOBITH,	Rijkswaterstaat, Lelystad, Niederlande.

Das gemischt deterministisch-stochastische Modell RHEINFELDEN erzielt eine Vorhersagezeit von 2-3 Tagen durch die Einbindung der Schneeschmelze und der quantitativen Niederschlagsvorhersage.

Die französischen Modelle ILL und SAAR werden z.Zt. getestet und befinden sich in der quasi-operationellen Phase. Sie sind vom stochastischen Typ der Mehrfachregression, dabei werden überwiegend Abflußdaten benutzt mit der Konsequenz der Einengung der Vorhersagezeit auf 24 Stunden.

Die Modelle für die MOSEL werden z. Zt. überarbeitet und sind noch nicht operationell. Die neuen Modelle werden vom stochastischen, autoregressiven Typ sein.

Le modèle déterministe du Rhin RHEINA de l'Institut fédéral de l'Hydrologie est également dans sa phase opérationnelle, mais cependant actuellement jusqu'à la station de Worms/Rhin. Ce modèle utilise comme données d'entrée, les prévisions du modèle de RHEINFELDEN, ainsi que les données de débits provenant d'environ 40 stations hydrométriques et des données de précipitations provenant d'environ 40 stations, ainsi que les prévisions des précipitations fournies par le modèle BKF du Service Météorologique Allemand [GREBNER, 1982].

Le modèle MKF de l'Institut fédéral de l'Hydrologie réalise un temps de prévision de 24 à 36 heures, mais ce modèle n'utilise que des données pouvant être obtenues téléphoniquement, de sorte que, lors des crues de 1980 et ultérieurement on a pu émettre des prévisions opérationnelles des niveaux d'eau et des débits pour les stations entre Worms et la frontière néerlandaise.

Vue l'étendue du bassin versant et compte tenu de la capacité de persistance des débits, même sans l'utilisation de données de précipitations, le modèle de LOBITH réalise un temps de prévision de 4 jours. Ce modèle utilise comme données d'entrée les niveaux d'eau aux nombreuses stations hydrométriques du Rhin. Le niveau d'eau à la station de Lobith est calculé à partir des différents temps d'écoulement. Depuis 1984 une nouvelle version de ce modèle est opérationnelle.

En guise de recommandation pour l'avenir, l'organigramme (fig. 1.1) montre le flux d'information de données et de prévisions, conformément à la direction d'écoulement de l'eau du Rhin du sud vers le nord. Tout particulièrement, on souligne le fait que les prévisions du modèle RHEINFELDEN sont utilisées comme données d'entrée pour le modèle RHEINA et les prévisions du modèle RHEINA et/ou MKF comme entrée pour celui de LOBITH. Le groupe de concertation recommande d'examiner la possibilité d'utiliser également les prévisions du modèle de l'ILL, (éventuellement aussi de la MOSELLE et de la SARRE) comme données d'entrée pour le modèle RHEINA, ce qui signifierait un gain quant à la précision et sur le temps de prévision.

Les brèves descriptions, faites sur la base de questionnaires, permettent une comparaison des différents modèles de prévision dans le bassin du Rhin.

Lors de l'établissement des contributions nationales, on s'est abstenu volontairement de procéder selon un schéma uniforme, afin que les différents auteurs aient la possibilité de s'étendre sur les structures particulières des modèles concernés et de leurs prévisions.

Das deterministische Rheinmodell RHEINA der Bundesanstalt für Gewässerkunde befindet sich im operationellen Einsatz, jedoch z.Zt. nur bis zum Pegel Worms/Rhein. Es benutzt als Dateninput die Vorhersage des Modells RHEINFELDEN, sowie neben Abflußdaten an ca. 40 Pegeln und Niederschlagsdaten an ca. 40 Stationen auch eine vom Deutschen Wetterdienst nach einem BKF-Modell erstellte Niederschlagsvorhersage [GREBNER, 1982].

Das Mehrkanalfilter-Modell MKF der Bundesanstalt für Gewässerkunde erreicht eine Vorhersagezeit von 24 bis 36 St., jedoch stammen hier die Betriebsdaten ausschließlich von abrufbaren Pegeln, sodaß während der Hochwasserwelle von 1980 und später bereits operationelle Wasserstands- und Abflußvorhersagen für Rheinpegel zwischen Worms und der niederländischen Grenze durchgeführt werden konnten.

Die Vorhersage nach dem Modell LOBITH gestattet wegen der Größe des Einzugsgebietes und dem damit zusammenhängenden Beharrungsvermögen des Abflusses auch ohne Verwendung von Niederschlagsdaten eine Vorhersagezeit von 4 Tagen. Hier werden die Wasserstände an zahlreichen Pegeln des Rheingebietes als Betriebsdaten benutzt und der Wasserstand am Pegel Lobith damit aus den einzelnen Fließzeiten berechnet. Ab 1984 ist eine neuere Version dieses Modelles im Betrieb.

Das Flußdiagramm (Abb. 1.1) verdeutlicht als Empfehlung für die Zukunft den Informationsfluß von Daten und Vorhersagen entsprechend der Fließrichtung des Wassers von Süd nach Nord. Hier sei im besonderen auf die bestehende Eingabe der Vorhersage RHEINFELDEN in das Modell RHEINA und die Vorhersage RHEINA und/oder MKF in das Modell LOBITH hingewiesen. Als Empfehlung seitens der Kontaktgruppe sei die Möglichkeit verstanden, auch die Vorhersagen nach ILL (evtl. auch nach MOSEL und SAAR) in das Modell RHEINA zu übernehmen, was einen Gewinn an Genauigkeit und Vorhersagezeit bedeuten würde.

Die aufgrund eines Fragebogens abgefaßten Kurzbeschreibungen ermöglichen einen Vergleich der verschiedenen im Rheineinzugsgebiet angewandten Vorhersagemodelle.

Zur Abfassung der nationalen Beiträge wurde bewußt nicht nach einem einheitlichen Schema vorgegangen, um den einzelnen Autoren die Möglichkeit zu geben, auf die besonderen Strukturen der betreffenden Modelle und Vorhersagen vertieft einzugehen.

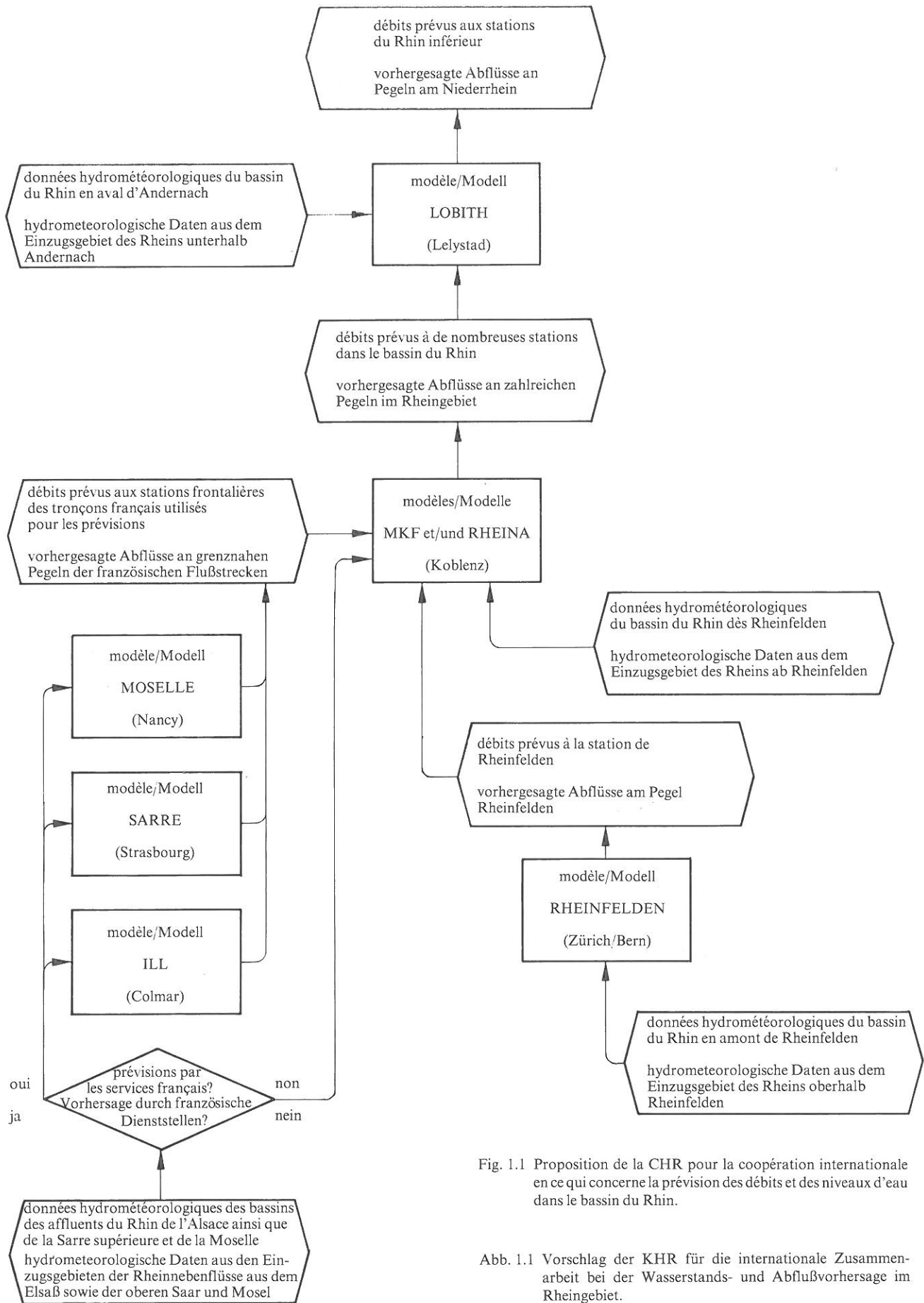


Fig. 1.1 Proposition de la CHR pour la coopération internationale en ce qui concerne la prévision des débits et des niveaux d'eau dans le bassin du Rhin.

Abb. 1.1 Vorschlag der KHR für die internationale Zusammenarbeit bei der Wasserstands- und Abflüßvorhersage im Rheingebiet.

2. QUESTIONNAIRE

Pour la présentation des modèles hydrologiques déjà en service ou en cours d'élaboration, on a eu recours entre autres à un questionnaire. Les renseignements ainsi obtenus, sont donnés dans le tableau 2.1. Ce tableau permet de comparer la structure des modèles, le but des prévisions et les données nécessaires pour l'étalonnage comme pour l'exploitation. Le nom de la personne compétente en la matière ainsi que son numéro de téléphone figurent également dans le tableau.

2. FRAGEBOGEN

Zur Erfassung der im Rheingebiet jetzt betriebenen oder im Aufbau befindlichen hydrologischen Modelle bediente man sich u.a. eines Fragebogens. Die so erhaltenen Informationen sind in Tabelle 2.1 erläutert. Sie gibt einen vergleichenden Überblick über den Modellaufbau, das Vorhersageziel, den Stand der Vorhersage und die erforderlichen Eich- und Betriebsdaten. Auch ist der Name des zuständigen Sachbearbeiters einschließlich seines Telefonanschlusses ersichtlich.

Tab. 2.1 Inventaire des prévisions opérationnelles de niveaux d'eau et de débits dans le bassin du Rhin

Nom des modèles	Prévision RHEINFELDEN	Prévision ILL	Prévision MOSELLE	Prévision SARRE	Prévision RHEINA	Prévision MKF	Prévision LOBITH
1. Centre de prévision	Landeshydrologie und -geologie CH-3003 Bern	S.R.A.E. Alsace, Ministère de l'Agriculture 24, Grand'Rue Horbourg- Wihr F-68000 Colmar	Service de la navigation de Nancy 28, bd. Albert-ler F-54000 Nancy	Service de la navigation de Strasbourg 25, rue de la Nuée Bleue F-67081 Strasbourg- CEDEX	Bundesanstalt für Gewässer- kunde Kaiserin Augusta Anlagen 15-17 D-5400 Coblenz	Bundesanstalt für Gewässer- kunde Kaiserin Augusta Anlagen 15-17 D-5400 Coblenz	Rijkswaterstaat Dienst Binnenwateren/ RIZA Maerlant 4-6 NL-8200 AA Lelystad
2. Personne responsable de l'exploitation de la prévision, téléphone	M. Schädler Tél. 031/619256 M. de Montmollin Tél. 031/619255 Télex 912855 LHG CH	— Tél. 89410663	M. Abèle Tél. 83953001	M. Mager, Subdivision de Sarreguemines Tél. (87)985289	M. Mendel Tél. 0261/1306350 et 0261/1306348	M. Wilke Tél. 0261/1306351	M. Van der Valk, Berichtencentrum Tél. 03200/44011
3. Echelle pour laquelle est faite la prévision, fleuve/superficie du bassin versant concerné	Rheinfelden Rhin/ 34606 km ²	Colmar/III/1720 km ²	Malzéville/Meurthe/ 2930 km ² Toul/Moselle/3397 km ² Custines/Moselle/6829 km ² Metz/Moselle/7877 km ² Uckange/Moselle/ 10762 km ²	Keskastel/Sarre/878 km ² Sarralbe/Sarre/1315 km ² Witting-Sarreinsming/ Sarre/1759 km ²	Maxau Rhin/50343 km ² Speyer/Rhin/ 54136 km ² Heidelberg/Neckar/ 13800 km ² Mannheim/Rhin/ 54136 km ² Worms/Rhin/68963 km ² plus tard Kaub/Rhin/ 103729 km ²	Speyer/Rhin/53235 km ² Mannheim Rhin/ 54136 km ² Worms/Rhin/68936 km ² Mayence/Rhin/ 98488 km ² Bingen/Rhin/99277 km ² Kaub/Rhin/103729 km ² Coblence/Rhin/ 110075 km ² Andernach/Rhin/ 139795 km ² Bonn/Rhin/141162 km ² Cologne/Rhin/ 144612 km ² Düsseldorf/Rhin/ 148040 km ² Ruhrort/Rhin/ 153176 km ² Wesel/Rhin/154528 km ² Rees/Rhin/159683 km ² Emmerich/Rhin/ 159784 km ²	Lobith, Rhin/160000 km ²
4. Objectif de la prévision	hauteurs et débits, jusqu'à 72 heures, pas d'une heure	débits jusqu'à 24 heures, pas de temps 6 heures, journalièrement en cas de crue	hauteurs et débits de crue, pas de temps 6 heures, antériorités: Malzéville, Toul et Custines: 8 et 12 heures Metz et Uckange: 8 en 24 heures	prévisions jusqu'à 24 heures, pas de temps 6 heures	hauteurs et débits jusqu'à 48 heures, pas de temps 6 heures, quotidiennement en période de crue	hauteurs d'eau à 6, 12, 18 et 24h trois fois par jour (5, 11 et 17 heures TEC)	hauteurs et débits à 1, 2, 3 et 4 jours
5. Nom et caractéristiques du modèle	RHEINFELDEN, modèle de transformation pluies- débits	ILL, modèle de trans- formation pluies-débits	MOSELLE, modèle auto- régressif de prévision	SARRE, modèle basé sur des régressions multi- ples linéaires, avec les débits et la pluviométrie des stations amonts	RHEINA, modèle détec- tiste reproduisant les précipitations et les débits avec subdivision en sous-bassins	MKF, modèle à fil- trage multicanal, linéaire et invariant dans le temps	LOBITH, modèle détec- tiste de prévision de débits avec addition des débits partiels tout en considé- rant les temps de parcours

6. Auteur du modèle (nom et no. de tél.)	M. Jensen IG de l'EPF-Zürich Tél. 01/257/5232	C.E.M.A.G.R.E.F., Subdivision Hydrologie MM. Leviandier et Oberlin Tél. 78834948	M. Guilbot Laboratoire d'Hydrologie Mathématique de Montpellier tél. 67633339	M. Bayle, Mme. Fournaise Tél. (88)362571	M. Mendel Tél. 0261/1306350 et 0261/1306348	M. Wilke Tél. 0261/1306351	M. Van der Made Tél. 070/889370
7. Subdivisions caractéristiques du modèle	a. prétraitement des données	prétraitement des données	prétraitement des données	prétraitement des données	prétraitement des données	fonctions de transfert à partir des relations corrélatives et mutuelles des entrées et sorties. Con- volution linéaire des dif- férences des hauteurs ou des débits	prétraitement des données
	b. précipitations régionales et indice régional de fonte de la neige pour des bassins partiels	fonte de neige	calculs de prévision amont-aval (pas de modèles emboîtés)	pluies-débits	précipitations régionales et indice régional de fonte de la neige pour des bassins partiels		calcul de prévision d'après les niveaux d'eau des affluents Neckar, Main, Nahe, Moselle, Lahn et Ruhr et des tronçons rhénans suivants: Maxau-Worms; Worms-Kaub; Kaub-Cologne; Cologne-Lobith
	c. transformation pluies-débits, flood-	pluies-débits	retransformation en hauteurs des débits				

Tab. 2.1 Erfassung operationeller Wasserstands- und Abfluvorhersagen im Rheingebiet

Name des Modells	Vorhersage RHEINFELDEN	Vorhersage ILL	Vorhersage MOSEL	Vorhersage SAAR	Vorhersage RHEINA	Vorhersage MKF	Vorhersage LOBITH
1. Vorhersagezentrale	Landeshydrologie und -geologie CH-3003 Bern	S.R.A.E. Alsace, Ministère de l'Agriculture 24, Grand'Rue Horb-Wihr, F-68000 Colmar	Service de la navigation de Nancy 28, bd. Albert-1er F-54000 Nancy	Service de la navigation de Strasbourg 25, rue de la Nûée Bleue F-67081 Strasbourg- CEDEX	Bundesanstalt für Gewässerkunde Kaiserin Augusta Anlagen 15-17, D-5400 Koblenz	Bundesanstalt für Gewässerkunde Kaiserin Augusta Anlagen 15-17, D-5400 Koblenz	Rijkswaterstaat Dienst Binnenwateren/ RIZA Maerlant 4-6 NL-8200 AA Lelystad
2. Sachbearbeiter für den Betrieb der Vorhersage, Telefon	Herr Schädler Tel. 031/619256 Herr de Montmollin Tel. 031/619255 Telex 952855 LHG CH	- Tel. 89 41 06 63	Herr Abèle Tel. 83 95 30 01	Herr Mager, Subdivision de Sarreguemines Tel. (87)985289	Herr Mendel Tel. 0261/1306350 und 0261/1306348	Herr Wilke Tel. 0261/1306351	Herr Van der Valk, Berichtencentrum Tel. 03200/44011
3. Vorhersagepegel/Fluß/Einzugsgebietsfläche	Rheinfelden/Rhein/ 34606 km ²	Colmar/Ill/1720 km ²	Malzéville/Meurthe/ 2930 km ² Toul/Mosel/3397 km ² Custines/Mosel/ 6829 km ² Metz/Mosel/7877 km ² Uckange/Mosel/ 10762 km ²	Keskastel/Saar/878 km ² Sarralbe/Saar/1315 km ² Wittringen- Sarreinsming/ Saar/1759 km ²	Maxau/Rhein/ 50343 km ² Speyer/Rhein/ 53235 km ² Heidelberg/Neckar/ 13800 km ² Mannheim/Rhein/ 54136 km ² Worms/Rhein/ 68936 km ²	Speyer/Rhein/ 53235 km ² Mannheim/Rhein/ 54136 km ² Worms/Rhein/ 68936 km ² Mainz/Rhein/98488 km ² Bingen/Rhein/ 99277 km ² Kaub/Rhein/ 103729 km ² Koblenz/Rhein/ 110075 km ² Andernach/Rhein/ 139795 km ² Bonn/Rhein/ 141162 km ² Köln/Rhein/144612 km ² Düsseldorf/Rhein/ 148040 km ² Ruhrort/Rhein/ 153176 km ² Wesel/Rhein/ 154528 km ² Rees/Rhein/159683 km ² Emmerich/Rhein/ 159784 km ²	Lobith/Rhein, 160000 km ²
4. Vorhersageziel	Wasserstände und Abflüsse bis 72 Stunden, Zeitschritt 1 Stunde	Abflüsse bis 24 Stunden, Zeitschritt 6 Stunden, täglich bei Hochwasser	Wasserstände und Abflüsse bei Hochwasser Zeitschritt 6 Stunden, Vorhersagefristen: Malzeville, Toul und Custines: 8 und 12 Stunden Metz und Uckange: 8 und 24 Stunden	Wasserstände und Abflüsse bei Hochwasser, Vorhersagen bis 24 Stunden, Zeitschritt 6 Stunden	Wasserstände und Abflüsse bis 48 Stunden, Zeitschritt 6 Stunden, täglich bei Hochwasser	Wasserstände für 6, 12, 18 und 24 Stunden im voraus, dreimal täglich (5, 11 und 17 Uhr MEZ)	Wasserstände und Abflüsse 1, 2, 3 und 4 Tage im voraus

8. Benutzte Rechen- geräte	c. Niederschlag-Abfluß und Floodrouting d. Seeretenion, Regulier- vorschriften	Niederschlag-Abfluß Taschenrechner	Umsetzung der berech- neten Abflüsse in Wasserstände	Umsetzung der berech- neten Abflüsse in Wasserstände	Niederschlag-Abfluß und Floodrouting	Siemens 7760	Mikrocomputer
9. Anzahl und Art der Meßstationen	a. 25 automatische Niederschlagssta- tionen, stündlich b. 19 Klimastationen, halbtäglich c. ca. 23 automatische Pegelstationen	5 telefonisch abrufbare, fernmeldende Wasser- standsmeßstellen 1 Niederschlags- meßstelle 2 Klimastationen	ungefähr 5 Niedersch- lagsstationen und 20 Pe- gelstationen	GOUPIL 2	Siemens 7760	Siemens 7760	10 Wasserstandsmeßstel- len 8 Niederschlagsmeßstellen
10. Datenübertra- gung	Telex, Telefon, Datenüber- tragungsstation, Pegelab- fragegerät	telefonische Fernüber- tragung, zum Teil in Vorbereitung	Fernübertragung über Telefon und Rundfunk	Telefon	Telefon, Telex, automa- tisches Datenerfassungss- ystem (Alligomatie)	Telefon	Rundfunk, Teletext, Telefon, Telex
11. Datenverar- beitung	automatisch mit visueller Kontrolle	manuell	automatisch	manuell und automati- sche Speicherung und Bearbeitung der Daten durch Rechner	manuell über Rechen- konsole	manuell über Rechen- konsole	manuell über Tabellen
12. Oberliegendvor- hersage	–	–	–	–	RHEINFELDEN	–	RHEINFELDEN und MKF nach Abfrage
13. Stand der Vorhersage	operationelle Vorhersage gemäß dem jeweiligen Ent- wicklungszustand des Mo- delles, Ausgabe an Interes- sierte	Modell in Bearbeitung, nicht operationell	Modell in Bearbeitung Ausrüstung wird auf- gestellt	quasi-operationell, könnte in der nächsten Phase für das obere Einzugsgebiet ergänzt werden	operationell	operationell	operationell
14. Bemerkungen	es werden Temperatur- und quantitative Nie- derschlagsvorhersagen ver- wendet	–	Terminen: Modelle fertig Ende 1988 manueller operationeller Einsatz Ende 1989 automatischer Einsatz ab 1990	–	–	–	Aktualisierung und Ver- besserung der Kontakte mit örtlichen Dienststellen wurde vorgenommen

5. Name und Charakterisierung des Modelles	RHEINFELDEN, Niederschlag-Abflußmodell für räumlich gegliedertes Einzugsgebiet	ILL, Niederschlag-Abfluß-Modell	MOSEL, autoregressives Hochwasservorhersagemodell	SAAR, Mehrfachregressionsmodell mit Abfluß- und Niederschlagsdaten von stromaufwärts gelegenen Meßstationen	RHEINA, deterministisches Niederschlag-Abfluß-Modell für räumlich gegliedertes Einzugsgebiet	MKF, Mehrkanalfitterung, lineares zeit-invariantes Modell	LOBITH, deterministisches Abflußmodell mit Summierung partieller Abflüsse und Laufzeitberücksichtigung
6. Ersteller des Modelles, Name und Telefon	Herr Jensen GGI-ETH Zürich Tel. 01/257/5232	C.E.M.A.G.R.E.F., Subdivision Hydrologie, Herr Leviandier und Herr Oberlin Tel. 78834948	Herr Guilbot, Laboratoire d'Hydrologie Mathématique Montpellier Tel. 67633339	Herr Bayle, Frau Fournaise Tel. (88)362571	Herr Mendel Tel. 0261/1306350 und 0261/1306348	Herr Wilke Tel. 0261/1306351	Herr Van der Made Tel. 070/889370
7. Modelteile	a. Datenaufbereitung	Datenaufbereitung	Datenaufbereitung	Datenaufbereitung	Datenaufbereitung	Übertragungsfunktionen aus den korrelativen Zusammenhängen der Eingänge untereinander und bezüglich des vorherzusagenden Ausgangs. Lineare Faltung (Korrelation) von Wasserstands- oder Abflußdifferenzen	Datenaufbereitung
	b. Gebietsniederschläge und Schmelzraten für Teilgebiete	Schneeschmelze	Vorhersageberechnungen obere-untere Mosel (keine ineinandergreifenden Modelle)	Niederschlag-Abfluß	Gebietsniederschläge bzw. Schneeschmelzraten für Teilgebiete		Vorhersageberechnung aus den Wasserständen an den Nebenflüssen Neckar, Main, Nahe, Mosel, Lahn

3. HISTORIQUE DES PRÉVISIONS DES HAUTEURS D'EAU ET DES DÉBITS DANS LE BASSIN DU RHIN

3.1 Introduction

Les premières traces de services d'annonce des crues peuvent déjà être trouvées dans l'antiquité. Ainsi, on suppose que les Sumériens entre environ 3000 et 2000 a. JC étaient en mesure de prédire le commencement de la saison des pluies et l'approche des eaux de fonte de neige. Dans l'Égypte ancienne, les hauteurs de crue à attendre chaque année étaient annoncés par de rapides rameurs qui partaient de Haute-Égypte aussitôt que l'onde de crue arrivait, pour avertir la population du danger de crue dans les zones principales de production agricole et dans les grandes villes [GABRECHT, 1984].

On n'a pas connaissance d'autres annonces de crues dans l'antiquité ou dans le moyen âge. Ce n'est qu'au début des temps modernes que l'on trouve les traces de tels annonces.

En 1573, par exemple, un service d'annonce des crues fut établi en Chine sur la rivière Hoang Ho. On pense que des cavaliers devançaient les ondes de crue le long de la rivière pour transmettre l'alerte de danger. En Europe centrale, les services d'annonce des crues commencent à se développer beaucoup plus tard. Sur l'Elbe c'est à la fin du 18^{ème} siècle que l'on commence à réaliser un service d'alerte pour les crues. Ici, comme sur bien d'autres fleuves, les alertes de crues étaient transmises à coups de canon.

Les débuts des calculs de prévisions remontent au milieu du 19^{ème} siècle. Les prévisions des crues, estimées sur la base des relevés pluviométriques, sont déjà lancées en décembre 1845 par Lortet pour le bassin de la Saône à Lyon/France avec 4 jours d'avance. D'autres prévisions des débits préparées par Belgrand pour le bassin de la Seine/France suivent en 1854. Les travaux de Belgrand ont donné les premières impulsions pour le développement des procédés de prévision sur d'autres rivières en Europe centrale.

3.2 Développement historique des prévisions des hauteurs d'eau et des débits dans le bassin du Rhin

En ce qui concerne les services d'annonce ou de prévision des crues dans le bassin du Rhin, aucun fait n'est connu avant la fin du 18^{ème} siècle. Toutefois, on a déjà commencé à exécuter des observations régulières sur les hauteurs d'eau à la fin du 18^{ème} siècle (Zutphen 1765, Düsseldorf 1766, Emmerich 1770, Cologne, Pannerden, Arnhem 1772, Gorinchem, Vreeswijk 1778, Coblenz 1785).

3. HISTORISCHE ENTWICKLUNG DER WASSERSTANDS- UND ABFLUßVORHERSAGEN IM RHEINGEBIET

3.1 Einleitung

Erste Ansätze für Hochwassernachrichtendienste und Hochwasservorhersagen gibt es bereits im Altertum. So sollen die Sumerer bereits etwa 3000 bis 2000 v. Chr. in der Lage gewesen sein, das Einsetzen der Regenzeit und das Herannahen der Schneeschmelzwässer vorherzusagen. Im alten Ägypten wurden im jeweiligen Jahr zu erwartende Hochwasserstände nach dem Eintreffen der Hochwasserwelle in Oberägypten durch schnelle Ruderer, die der Hochwasserwelle vorauseilten, in den landwirtschaftlichen Hauptanbaugebieten und den großen Städten angekündigt [GABRECHT, 1984].

Über weitere Hochwassermeldungen im Altertum und im Mittelalter ist nichts bekannt. Erst mit Beginn der Neuzeit sind Ansätze für derartige Meldungen zu finden.

So wurde in China ein Hochwassermeldedienst am Hoang Ho im Jahre 1573 eingerichtet. Schnelle Reiter sollen entlang des Flusses den Hochwasserwellen vangeritten sein und Warnungen überbracht haben. Die Entwicklungen der Hochwassernachrichtendienste in Mitteleuropa setzte viel später ein. An der Elbe begann man mit der Einrichtung des Hochwasserwarndienstes am Ende des 18. Jahrhunderts. Hier wurden, wie damals an vielen anderen Flüssen, Hochwassermeldungen durch Kanonenschüsse weitergegeben.

Die Anfänge von Vorhersageberechnungen gehen auf die Mitte des 19. Jahrhunderts zurück. Bereits im Dezember 1845 wurden für das Gebiet der Saône bei Lyon/Frankreich durch Lortet aus Niederschlägen berechnete Hochwasserstände im voraus für 4 Tage herausgegeben. Weitere Wasserstandsvorhersagen für das Gebiet der Seine/Frankreich folgten durch Belgrand im Jahre 1854. Die Arbeiten von Belgrand gaben die Impulse für die Entwicklung der Vorhersageverfahren an anderen Flüssen in Mitteleuropa.

3.2 Historische Entwicklung der Wasserstands- und Abflußvorhersagen im Rheingebiet

Im Rheingebiet ist über Hochwasserwarn- und vorhersagedienste vor Ende des 18. Jahrhunderts nichts überliefert. Mit regelmäßigen Wasserstandsbeobachtungen wurde bereits Ende des 18. Jahrhunderts begonnen (Zutphen 1765, Düsseldorf 1766, Emmerich 1770, Köln, Pannerden, Arnhem 1772, Gorinchem, Vreeswijk 1778, Koblenz 1785).

Aux Pays-Bas, les données sur les niveaux d'eau sont publiées à partir de 1816 dans le »Staatscourant«. Dès 1870, les valeurs journalières des hauteurs d'eau relevées sur les limnimètres du Rhin, sont annoncées au Rijkswaterstaat. Après 1886, les quotidiens les plus importants reçoivent chaque jour un télégramme avec ces niveaux. C'est déjà avant la 2ème guerre mondiale que les hauteurs d'eau à quelques stations importantes du Rhin et de ses affluents furent communiquées par radio. Après la guerre, ces communications par radio furent reprises. Depuis quelques années, on procède aussi à la diffusion par vidéotext (»Viditel«). Entretemps, l'envoi quotidien de télégrammes a été arrêté.

Les rapports sur les crues sont effectués depuis longtemps par la »Buitengewone Riviercorrespondentie, BRC« (correspondance fluviale extraordinaire). Dans les années 1798 à 1803, l'on s'efforça de centraliser et de réglementer l'établissement des rapports sur les niveaux d'eau pendant les périodes de crue et de charriage des glaces, pour être en mesure de prendre des dispositions aussitôt que possible en cas d'inondations catastrophiques. Les relevés des niveaux d'eau, faits plusieurs fois par jour, ont été transmis d'abord par courriers spéciaux puis, à partir de 1862, par voie télégraphique.

Le premier règlement pour l'exécution des rapports sur les niveaux d'eau en cas de hautes eaux ou de charriages des glaces est daté du 10 janvier 1806 [WELCKER, 1880; MAZEL, 1886; VAN ITTERSUM, 1906]. Les instructions incluses dans ce règlement ont été revues et modifiées plusieurs fois. La publication du dernier règlement général, basé sur l'article 17 de la loi fluviale de 1900, est datée de l'année 1951. Ce règlement de BRC est mis en vigueur par ordonnance ministérielle en cas de hauts débits ou en cas de charriage de glaces importants. Il donne plein-pouvoir aux fonctionnaires du Rijkswaterstaat pour prendre des mesures contre les inondations et les menaces d'inondations.

En 1849, lorsque dans l'Etat Prussien les premiers télégraphes furent mis en service, les présidents des provinces allemands, menacées par les crues, reçurent pour la première fois des instructions pour l'installation d'un service de transmission télégraphique des niveaux. En 1853, des réglementations plus spécifiques, concernant les annonces de crues suivirent pour le Rhin, ainsi que pour la plupart des rivières dans l'Europe centrale. Conformément à ces règlements, les informations sur les crues doivent être transmises à tous les groupes intéressés, comme par exemple les associations gérant les digues contre les inondations, les villes, les communes et la presse, au moyen de télégrammes spéciaux, dénommés WOBS (observation des eaux).

Pour la Moselle, la Sarre et la Sûre près de Trèves, un premier règlement d'annonce des crues a été déjà in-

In den Niederlanden wurden ab 1816 Tageswerte der Wasserstände in dem »Staatscourant« veröffentlicht. Seit 1870 werden täglich Wasserstände von Rheinpegeln an den Rijkswaterstaat gemeldet. Ab 1886 wurde täglich ein Telegramm mit diesen Daten an die bedeutendsten Tageszeitungen gesandt. Bereits vor dem 2. Weltkrieg wurden die Wasserstände an einigen wichtigen Stationen des Rheins und seinen Nebenflüssen über Rundfunk bekanntgegeben. Nach dem Kriege wurde diese Berichterstattung wiederaufgenommen; seit einigen Jahren erfolgt die Verbreitung ebenfalls über Videotext (»Viditel«). Der tägliche Versand von Telegrammen ist mittlerweile eingestellt.

Die Hochwassermeldungen werden seit langem von den sogenannten »Buitengewone Riviercorrespondentie, BRC« (außerordentliche Flußkorrespondenz) vorgenommen. Bereits in den Jahren 1798 bis 1803 wurde versucht, die Berichterstattung über die Wasserstände bei zu erwartendem Hochwasser und bei einem möglichen Eisgang zentral zu regeln, mit dem Ziel, bei drohenden Katastrophen schnell Maßnahmen ergreifen zu können. Die mehrfach täglich erfaßten Wasserstände wurden zunächst von einem Sonderkurier und ab 1862 telegraphisch weitergeleitet.

Die erste Regelung über die Meldung bei Eisgang und hoher Wasserführung datiert vom 10. Januar 1806 [WELCKER, 1880; MAZEL, 1886; VAN ITTERSUM, 1906]. Diese Anweisung wurde mehrfach überarbeitet. Die letzte allgemeine Meldeordnung, die auf Paragraph 17 des Flußgesetzes von 1900 basiert, wurde 1951 herausgegeben. Die BRC tritt, durch ministerielle Verfügung, bei hohen Abflüssen oder bei starkem Eisgang in Kraft. Sie gibt Beamten des Rijkswaterstaat besondere Vollmachten um Maßnahmen gegen drohende oder bereits eingetretene Überschwemmungen einzuleiten.

Als im Jahre 1849 in Preußen die ersten Telegraphen für den öffentlichen Dienst in Betrieb genommen wurden, ergingen an die Oberpräsidenten der durch Hochwasser gefährdeten deutschen Provinzen erstmals Anweisungen für die Einrichtung eines telegraphischen Wasserstandsnachrichtendienstes. Genauere Vorschriften für die Wasserstandsnachrichten bei Hochwasser folgten für den Rhein wie für die meisten mitteleuropäischen Flüsse im Jahre 1853. Darin wurde festgelegt, Informationen über Hochwasser mittels sogenannter WOBS (Wasser-Observation)-Telegramme an Interessenten wie z.B. Deichverbände, Städte, Gemeinden und Presse weiterzugeben.

Für Mosel, Saar und Sauer bei Trier wurde bereits eine erste Hochwassermeldeordnung im Jahre 1880 ein-

troduit en 1880. Un règlement concernant l'unification des moments d'observation en cas de crue existait déjà depuis 1872. Un règlement d'annonce des crues pour la Moselle, la Sarre et la Blies suivit en 1897.

Dès lors, les riverains du cours inférieur de la Moselle purent être informés sur les crues et les charriages des glaces se formant en amont assez longtemps d'avance pour être en mesure de prendre les dispositions de sécurité nécessaires. Avec l'introduction du système de communication télégraphique, les conditions préalables pour les prévisions des débits ont été créées. A l'exception de quelques modifications de détail, les règlements publiés en 1853 en Prusse pour le service d'annonce des débits restèrent inaltérés jusqu'en 1876. Quelques crues importants ont cependant indiqué les insuffisances dans les règlements existants. Pour le bassin du Rhin, le règlement d'annonce des crues revu et modifié est introduit le premier juillet 1886; toutefois, il est limité aux districts administratifs de Trèves, Coblenz, Cologne et Düsseldorf. Entre-temps, il a été continuellement complété (6 mars 1884, 6 janvier 1908, 10 novembre 1920).

Pour le Main, ce n'est qu'en 1883 que les annonces des crues sont soumises à une réglementation. Les relevés pluviométriques y sont déjà inclus.

Comme déjà mentionné, les méthodes de prévision des crues mises au point par le français Belgrand en 1854, ont aussi donné l'impulsion au développement des prévisions dans le bassin du Rhin. La méthode de Belgrand détermine les niveaux d'eau à partir des débits. La valeur du débit est obtenue par la sommation des débits isochrones temporellement corrélatifs, lesquels sont observés sur les limnimètres en amont. Belgrand a reconnu que les débits sont perpétuellement soumis à des changements quantitatifs sur leur chemin vers aval, par suite des apports d'eau, des pertes par infiltration et des aplatissements d'onde, et que par conséquent, une addition simple ne serait pas possible. C'est pourquoi le procédé simple de »l'addition des volumes« a été modifié par l'introduction de ce que l'on appelle les »débits équivalents«. Ceux-ci sont déterminés en tenant compte de la stabilité des niveaux et de la position des crêtes de crues. Cette méthode permet de tenir compte de variations des débits et des niveaux d'eau le long du cours vers l'aval. Pour être capable d'estimer les apports d'eau des affluents dont les débits sont inconnus, Belgrand a introduit les données pluviométriques. Ces méthodes seront recommandées plus tard par Maaß [1881] pour les appliquer sur le bas Rhin et elles sont introduites par Berring en 1884 pour la station limnimétrique d'Andernach/Rhin à titre d'essai.

En 1883, encouragé par l'introduction des prévisions météorologiques et par des essais de prévision

ggeführt. Es bestand jedoch bereits seit 1872 eine Regelung über die Vereinheitlichung der Beobachtungszeiten bei Hochwasser. Eine Hochwassermeldeordnung für Mosel, Saar und Blies folgte im Jahre 1897.

Den Anwohnern der unteren Moselstrecke konnte nunmehr von den in den oberen Teilen eingetretenen Hochwässern und Eisgängen auf telegraphischem Wege so rechtzeitig Nachricht gegeben werden, daß im allgemeinen noch Zeit blieb, die notwendigen Sicherheitsmaßnahmen zu treffen. Mit der Einführung des telegraphischen Meldewesens war die erste Vorbedingung für die Vorhersage von Wasserständen gegeben. Von geringfügigen Erweiterungen abgesehen, blieben die 1853 erlassenen Vorschriften für den Wasserstandsnachrichtendienst in Preußen bis zum Jahre 1876 unverändert bestehen. Einige Hochwässer ließen jedoch die Unzulänglichkeit der bestehenden Vorschriften erkennen. Am Rhein wurde die überarbeitete Hochwassermeldeordnung am 1. Juli 1886 eingeführt; sie beschränkt sich allerdings auf die Regierungsbezirke Trier, Koblenz, Köln und Düsseldorf. Sie wurde inzwischen wiederholt ergänzt (6. März 1884, 6. Januar 1908, 10. November 1920).

Hochwassermeldeordnungen für den Main folgten erst im Jahre 1883. Dabei wurden in die Meldeordnung bereits Niederschlagsbeobachtungen einbezogen.

Wie bereits erwähnt, gaben die im Jahre 1854 von dem französischen Wissenschaftler Belgrand entwickelten Hochwasservorhersageverfahren auch den Anstoß für die Entwicklung von Vorhersagen im Rheingebiet. Bei dem von Belgrand entwickelten Verfahren wird der vorherzusagende Wasserstand aus dem Abfluß ermittelt. Letzterer ergibt sich durch die Summierung zeitlich zusammengehörender Abflüsse der oberstrom gelegenen Pegel des Hauptflusses und der Nebenflüsse. Belgrand erkannte bereits, daß sich der Abfluß auf seinem Talweg mengenmäßig dauernd durch Zuflüsse, Versickerungen und Wellenabflachungen ändert und daß daher ein einfaches Addieren nicht möglich ist. Daher wurde das einfache »Mengen-Additions-Verfahren« durch die Einführung sogenannter gleichwertiger Wasserstände abgewandelt. Diese wurden aus dem Beharungswasserstand und dem Wellenscheitel einer zu Tal fließenden Welle ermittelt. Dadurch wurden die Änderungen des Abflusses und der Wasserstände entlang des Talweges berücksichtigt. Für die Abschätzung der Abflußmengen aus Nebenflüssen ohne Abflußdaten zog er erstmals auch Niederschlagsbeobachtungen heran. Diese Verfahren wurden später von Maaß [1881] für den Niederrhein empfohlen und im Jahre 1884 durch Berring versuchsweise für den Pegel Andernach/Rhein eingeführt.

Angeregt durch die Einführung der Wetterprognose und durch erste erfolgreiche Versuche von Vor-

couronnés de succès dans d'autres bassins fluviaux, on constitue une commission impériale en Allemagne pour étudier les conditions d'écoulement du Rhin et de ses affluents les plus importants. Cette commission se donne pour but de faire des investigations systématiques utiles à l'établissement de bases pour les prévisions des crues. Le programme de recherches est réalisé de 1886 à 1908 sous la direction de Honsell, du Bureau Central de Bade. Les résultats sont présentés dans huit tomes dont le dernier décrit l'état des prévisions en ce temps-là. On y rapporte que les prévisions réalisées à titre d'essai ont mené à un bon succès. Le procédé utilisé pour ces études comme point de départ l'onde primaire du Rhin, non encore influencée par les affluents. On se présente cette onde primaire, progressant d'abord seule dans le Rhin; puis sous l'influence des ondes ajoutées par les affluents et subissant ainsi une transformation qui dérive de hautes eaux précédentes. La méthode se base, exception faite du Neckar, sur les niveaux d'eau équivalents dûs à l'onde primaire, sans tenir compte de débits lui appartenant. En 1903, l'Autorité Administrative Rhénane propose d'appliquer la méthode recommandée par Maaß et introduite par Berring à titre d'essai aux prévisions des crues.

Une comparaison entre les deux méthodes de prévision montre pour le Rhin l'apparition dans les deux cas d'erreurs considérables. C'est pourquoi on tente d'utiliser tous les deux procédés en même temps. On a alors pensé que l'imperfection dans la fiabilité des calculs de prévision provenait de l'insuffisance des données disponibles. Pour permettre une correction des erreurs et pour compléter les courbes hauteur-débit, un grand nombre de mesures de débit furent exécutées au cours des années 1904 à 1909.

A partir de 1908, après la conclusion des études effectuées par le Bureau Central de Bade, l'Autorité Administrative Rhénane utilise uniquement la méthode prenant les volumes débités en considération. Les prévisions calculées postérieurement pour les crues des années 1914, 1915 et 1916 ont montré à nouveau des erreurs considérables. La Première Guerre mondiale et la confusion de l'après-guerre ont même entraîné une interruption dans le service d'annonce télégraphique, lors de deux grandes crues du Rhin en 1919/1920, on n'est plus du tout en mesure de réaliser des prévisions. Néanmoins, on effectue des corrections et des modifications dans les règlements d'annonce des crues.

En 1928, l'Institut National Prussien de Berlin prépare une expertise qui trouve que les causes de l'imperfection des prévisions sont moins dans les conditions naturelles de la rivière que dans l'insuffisance de la méthode utilisée. C'est pourquoi on recommande la méthode de la »courbe de référence limnimétrique«, une méthode qui avait été appliquée auparavant aux prévisions pour les rivières Oder et Weser. Cette méthode

hersagen in anderen Flußgebieten, wurde im Jahre 1883 im Deutschen Reich eine Reichskommission zur Untersuchung der Stromverhältnisse des Rheins und seiner wichtigsten Nebenflüsse einberufen mit dem Ziel, systematisch die Grundlagen für Hochwasservorhersagen zu untersuchen. Diese Arbeiten wurden unter Leitung von Honsell vom badischen Zentralbüro in den Jahren 1886 bis 1908 durchgeführt. Das Ergebnis liegt in acht Bänden vor, wobei der letzte den damaligen Stand der Vorhersagen wiedergibt. Dort wird über die versuchsweise mit befriedigendem Erfolg durchgeführte Vorhersage berichtet. Das benutzte Verfahren geht von der von Nebenflüssen unbeeinflussten primären Rheinwelle aus, die zunächst im Rhein vorrückend gedacht ist und dann durch Wellen aus Nebenflüssen eine aus früheren Hochwässern abzuleitende Umgestaltung erfährt. Das Verfahren ist, mit Ausnahme des Neckars, auf gleichwertigen Wasserständen aus der primären Rheinwelle ohne Verwendung der dazugehörigen Wassermengen aufgebaut. Bereits im Jahre 1903 unterbreitete die Rheinverwaltung den Vorschlag, das bereits von Maaß empfohlene und von Berring versuchsweise eingeführte Verfahren einzusetzen.

Ein Vergleich der beiden Vorhersageverfahren zeigte für den Rhein, daß größere Fehler in beiden Fällen vorkamen. Es wurden deshalb zunächst beide Verfahren nebeneinander angewandt. Nicht befriedigende Vorhersageberechnungen erklärte man durch die unzureichende Datengrundlage. Um diese zu verbessern, wurden in den Jahren 1904 bis 1909 zur Vervollständigung der Abflußkurven zahlreiche Abflußmessungen durchgeführt.

Nach Abschluß der Arbeiten des badischen Zentralbüros im Jahre 1908 wurde von der Rheinstromverwaltung nur noch das Abflußmengenverfahren angewandt. Nachträglich gerechnete Vorhersagen der Hochwasser von 1914, 1915 und 1916 ergaben wieder erhebliche Fehler. Der erste Weltkrieg und die Wirren der Nachkriegszeit brachten es mit sich, daß sogar der telegraphische Meldedienst versagte, als 1919/20 zwei große Hochwässer im Rhein auftraten. Zu einer Vorhersage kam es überhaupt nicht, jedoch zu einer Verbesserung der Meldeordnung.

Im Jahre 1928 erstellte die Preußische Landesanstalt für Gewässerkunde und Hauptnivellement in Berlin ein Gutachten, in dem die Ansicht vertreten wird, daß die Ursachen für die wenig befriedigenden Vorhersagen nicht in den natürlichen Verhältnissen des Stroms, sondern in der Unzulänglichkeit der benutzten Verfahren begründet liegen. Es wird daher das schon an der Oder und der Weser eingesetzte Pegelbezugsli-

détermine les hauteurs d'eau corrélatives, qui se produisent successivement aux limnimètres différents selon une forme régulière, conformément à la vitesse de progression de l'onde de crue, en les dérivant directement des observations isolées sur les crêtes du niveau d'eau de limnimètre en limnimètre. La méthode a été introduite ensuite dans le bassin du Rhin; elle est toujours encore appliquée, avec cependant quelques modifications, par l'Autorité Administrative des Eaux et de la Navigation, pour les prévisions des crues [KELBER, 1980].

Dans le bassin du Main, c'est à Wallner [1938] que l'on doit le perfectionnement des méthodes de prévisions. Il a développé une méthode graphique relativement simple qui considère, en plus des enregistrements pluviographiques et des apports d'eau de la section des limnimètres d'amont, aussi les débits provenant des bassins hydrologiques intermédiaires, ainsi que de l'emmagasinement de l'eau dans le sol et du stockage d'eau souterrain. Cette méthode a été perfectionnée entre-temps et elle est encore aujourd'hui utilisée dans le bassin du Main.

3.3 Les prévisions actuelles des hauteurs d'eau et des débits dans le bassin du Rhin

La station Centrale Suisse de Météorologie mène déjà en 1932 des études sur les possibilités de prévisions des débits pour la station de Bâle, en prenant les données pluviométriques comme point de départ. C'est au cours de ces études que l'on essaye pour la première fois l'application de la méthode de la régression multiple.

Dans les années 1949 à 1951, Hoeck fait des études préliminaires sur les prévisions des débits pour le Rhin en amont de Bâle. En mars 1955, la Division d'Hydrologie de l'École Polytechnique fédérale à Zürich commence à publier régulièrement, sous la direction de Kasser, des prévisions de débits mensuelles pour le Rhin à Rheinfelden. Ces prévisions se basent sur la dépendance entre les volumes débités et l'accumulation d'eau dans la couche de neige et dans les lacs et c'est pourquoi elles sont limitées essentiellement à la période de mars à octobre.

A partir de 1960, des prévisions à court terme, c.à.d. avec 3 jours d'avance, sont publiées; elles paraissent tout d'abord deux fois par semaine et plus tard trois fois par semaine pendant le semestre d'hiver. Dès 1975, ces prévisions sont aussi émises en été et depuis 1979 chaque jour pendant toute l'année. Le modèle de prévision des débits utilisé à présent, mais amélioré, est décrit dans la paragraphe 5.1 de ce rapport.

A cause de la prépondérance des temps en amont de Rheinfelden, par rapport à la durée de 3 jours de

nien-Verfahren vorgeschlagen. Das Verfahren ermittelt unmittelbar aus den Einzelbeobachtungen der Scheitelwasserstände kleinerer und größerer Anschwellungen von Pegel zu Pegel die zusammengehörenden Wasserstände, die der Fließgeschwindigkeit der Hochwasserwelle entsprechend in gesetzmäßiger Form nacheinander an den verschiedenen Pegeln regelmäßig auftreten. Dieses Verfahren wurde im Rheingebiet danach eingeführt und wird, wenn auch mit einigen Modifikationen, auch heute noch von den Wasser- und Schifffahrtsdirektionen bei Hochwasservorhersagen angewandt [KELBER, 1980].

Im Mainingebiet beschäftigte sich Wallner [1938] mit der Verbesserung der Vorhersageverfahren. Er entwickelte ein relativ einfach zu handhabendes graphisches Verfahren, das neben Niederschlägen und den Zuflüssen von oberstrom gelegenen Pegeln auch die Zuflüsse aus den Zwischeneinzugsgebieten sowie die Boden- und Grundwasserspeicherung berücksichtigt. Dieses Verfahren wurde in der Zwischenzeit weiter verbessert und gelangt auch heute noch im Mainingebiet zum Einsatz.

3.3 Die heutigen Wasserstands- und Abfluvvorhersagen im Rheingebiet

Die Schweizer Meteorologischen Zentralanstalt untersuchte bereits im Jahre 1932 Möglichkeiten für eine Vorhersage der Wasserstände am Pegel Basel aus Niederschlägen, wobei erstmals die Anwendung des Mehrfachregressionsverfahrens untersucht wurde.

Für den Rhein oberhalb von Basel führte Hoeck in den Jahren 1949-1951 für Abfluvprognosen einleitende Studien durch. Im März 1955 wurde an der Abteilung für Hydrologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich unter Leitung von Kasser mit der regelmäßigen Ausgabe von monatlichen Abfluvprognosen für den Rhein bei Rheinfelden begonnen. Sie stützten sich auf die Abhängigkeit der Wasserführung von den Wasserreserven in der Schneedecke und in den Seen und beschränkten sich deshalb im wesentlichen auf die Monate März bis Oktober.

Seit 1960 werden auch kurzfristige, d.h. 3-tägige Abfluvprognosen ausgegeben, zunächst zweimal, später dreimal wöchentlich im Winterhalbjahr, seit 1975 auch im Sommer und seit 1979 täglich während des ganzen Jahres. Das zwischenzeitlich weiter verbesserte Vorhersagemodell ist im Abschnitt 5.1 des vorliegenden Berichtes beschrieben.

Wegen der oberhalb Rheinfelden vorherrschenden und den im Vergleich mit der Prognosedauer von 3 Ta-

prévision, on a utilisé assez tôt simultanément des prévisions de précipitation quantitatives. Celles-ci ont été réalisées d'abord en coopération avec l'Institut Suisse de Météorologie. Dans les années 1972 à 1985 elles ont été préparées par la Division d'Hydrologie. Depuis que le Service hydrologique et géologique s'est chargé de la prévision de débits opérationnelle, les prévisions de précipitation quantitatives sont effectuées par l'Institut Suisse de Météorologie.

En République fédérale d'Allemagne, c'est au milieu des années soixante que l'on reprend les études pour perfectionner les prévisions hydrologiques dans le bassin du Rhin. En 1965, l'Institut fédéral d'Hydrologie fait usage d'une méthode de régression multiple pour les prévisions des étiages à la station limnimétrique de Kaub sur le Rhin moyen, un tronçon qui est considéré comme particulièrement critique pour la navigation. Plus tard, cette méthode est mise en application également pour la prévision des crues [TEUBER, 1970].

Au début des années soixante-dix, on essaye à l'Institut fédéral d'Hydrologie de faire usage de la méthode de filtrage à canaux multiples de Wiener (MKF) [WILKE, 1975, 1984] ainsi que la fonction de réponse multiple [HUTHMANN, 1982]. Le modèle de filtrage à canaux multiples s'est montré particulièrement approprié aux calculs de prévision. Dans les années 1975 à 1979, on a appliqué le modèle MKF au calcul quotidien de prévisions des étiages à la station limnimétrique de Kaub. Les applications du modèle aux prévisions des crues ont mis en évidence son efficacité dans ce domaine.

Au début de 1980, on tente avec succès d'établir des prévisions des hauteurs d'eau à la station hydrométrique de Coblenz sur la base des changements de six heures dans les hauteurs enregistrées aux stations limnimétriques du Rhin, de la Moselle et de la Lahn. Le rayon d'application de ce modèle a été étendu ensuite aux limnimètres de Speyer, Mannheim, Worms, Mayence, Bingen, Kaub, Andernach, Bonn, Cologne, Düsseldorf, Ruhrort, Wesel, Rees et Emmerich. Une description détaillée du procédé est présentée dans le paragraphe 5.5.

Dès le début des années soixante-dix, parallèlement au développement des modèles statistiques, l'élaboration du modèle RHEINA de prévision des crues du Rhin est en cours. Ce modèle se base sur la corrélation entre la précipitation régionale et le débit. Son application a été mise au point récemment pour la prévision des crues aux stations limnimétriques de Maxau, Speyer, Heidelberg, Mannheim et Worms. Le paragraphe 5.6 donne une description détaillée du modèle de ces prévisions.

gen kurzen Laufzeiten, wurden schon frühzeitig quantitative Niederschlagsvorhersagen mitverwendet. Sie entstanden während der ersten Jahre in Zusammenarbeit mit der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt und wurden zwischen 1972 und 1985 an der Abteilung für Hydrologie erstellt. Seit der Weiterführung der operationellen Abflußvorhersagen durch die Landeshydrologie und -geologie werden die quantitativen Niederschlagsprognosen von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt erarbeitet.

In der Bundesrepublik Deutschland wurden in der Mitte der 60er Jahre drei Untersuchungen zur Verbesserung hydrologischer Vorhersagen im Rheingebiet wieder aufgegriffen. So wurde bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde im Jahre 1965 ein Mehrfachregressionsansatz zur Vorhersage des Niedrigwassers an der für Schifffahrt kritische Mittelrheinstrecke bei Kaub angewandt. Später wurde dieser Ansatz auch für Hochwasservorhersagen verwendet [TEUBER, 1970].

Anfang der 70er Jahre wurde bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde die Anwendung der Wiener Mehrkanalfiltermethode (MKF) [WILKE, 1975, 1984] und die Multiple Response Funktion [HUTHMANN, 1982] versucht. Hierbei erwies sich das MKF-Modell als besonders geeignet. Es wurde in den Jahren 1975-1979 täglich zur Niedrigwasservorhersage am Rheinpegel Kaub eingesetzt. Anwendungen des Modells im Hochwasserbereich ließen dessen Eignung für die Hochwasservorhersage erkennen.

Anfang 1980 wurde der erforderliche Versuch unternommen, auf Basis von 6-stündlichen Wasserstandsänderungen an Rhein-, Mosel- und Lahnpegeln, Wasserstandsvorhersagen am Pegel Koblenz zu erstellen. Danach wurde der Anwendungsbereich dieses Modells auf die Rheinpegel Speyer, Mannheim, Worms, Mainz, Bingen, Kaub, Andernach, Bonn, Köln, Düsseldorf, Ruhrort, Wesel, Rees und Emmerich erweitert. Im Abschnitt 5.5 ist das Verfahren näher beschrieben.

Parallel zu der Weiterentwicklung statistischer Modelle wird in der Bundesanstalt für Gewässerkunde seit Anfang der 70er Jahre das flächendeckende Niederschlag-Abfluß-Modell RHEINA entwickelt und neuerdings für die Hochwasservorhersage an den Pegeln Maxau, Speyer, Heidelberg, Mannheim und Worms eingesetzt. Diese Vorhersage ist im Abschnitt 5.6 eingehend beschrieben.

Aux Pays-Bas, les premières tentatives de prévision des crues remontent aux années trente [PETIT, 1931]. Ces prévisions sont fondées sur des relevés limnimétriques à Cologne. En même temps, on s'occupe de l'idée de faire usage de prévisions allemandes à la station hydro-métrique d'Emmerich [VAN DER MEER, 1934]. C'est en février 1937 que les premiers rapports sur les hautes eaux concernant le Rhin et la Meuse sont publiés [VOW, 1938]. Grâce à la radio allemande les données sur les hauteurs d'eau dans la section allemande du Rhin sont connues à temps pour être utilisées à la préparation des prévisions. La méthode utilisée consiste à faire l'addition des débits du Rhin (station limnimétrique de Maxau) et des débits de ses grands affluents (le Neckar, le Main, la Moselle, la Lahn et la Ruhr) [WEMELSFELDER, 1953, 1972]. Malgré le fait que cette méthode soit basée sur les relations hydrauliques, elle s'est révélée trop inflexible, parce qu'elle ne permet pas de prévoir les variations rapides, que ce soient des accroissements ou des diminutions.

Dès 1980, on applique un modèle basé sur la régression linéaire multiple aux calculs de prévision. Ce procédé produit de meilleures valeurs de prévision que celui utilisé précédemment [DE RONDE, 1984]. Aujourd'hui, non seulement les données sur les niveaux d'eau actuels mais aussi les prévisions sont diffusées chaque jour par radio ou par Vidéotexte.

La prévision statistique du débit de base estival à Lobith avec échéance de 1 à 5 mois constitue un cas particulier. Quant au débit de base prévu, il s'agit de la limite inférieure pratique du débit [VAN DER MADE, 1982].

Des prévisions concrètes ne sont pas seulement faites en cas de crues, mais également en étiage. Dans la plupart des pays participants, la même méthode est alors utilisée en principe, bien que naturellement, les équations appliquées ne soient pas identiques. Le présent rapport se limite d'ailleurs presque uniquement à la prévision de crues.

In den dreißiger Jahren wurden in den Niederlanden erste Versuche angestellt, um Hochwasser vorherzusagen [PETIT, 1931]. Diese basierten auf Wasserstandsbeobachtungen in Köln. Gleichzeitig entstand die Idee, die deutsche Vorhersage für Emmerich zu übernehmen [VAN DER MEER, 1934]. Im Februar 1937 wurde zum ersten Mal eine Hochwasserberichterstattung für den Rhein und die Maas durchgeführt [VOW, 1938]. Da durch die deutschen Rundfunksender frühzeitig die Wasserstände an der deutschen Rheinstrecke bekannt sind, ließen sich diese für ein Vorhersageverfahren anwenden, welches daraus bestand, daß man die Abflüsse des Rheins (am Pegel Maxau) und seiner großen Nebenflüsse (Neckar, Main, Mosel, Lahn und Ruhr) addierte [WEMELSFELDER, 1953, 1972]. Obwohl dieses Verfahren auf physikalischen Zusammenhängen beruhte, erwies es sich als zu inflexibel und konnte schnelle Änderungen sowohl nach oben wie auch nach unten nicht befriedigend vorhersagen.

Seit 1980 wird ein lineares Mehrfach-Regressionsmodell eingesetzt. Dieses Verfahren liefert bessere Vorhersagewerte als das vorher angewandte Verfahren [DE RONDE, 1984]. Neben aktuellen Wasserständen werden heute in den Niederlanden auch täglich Vorhersagen über Rundfunk und Videotext verbreitet.

Ein besonderer Fall ist die statistische Vorhersage des Sommerbasisabflusses am Pegel Lobith, mit einer Vorhersagefrist von 1 bis 5 Monaten. Bei diesem vorhergesagten Basisabfluß handelt es sich um die praktische Untergrenze des Abflusses [VAN DER MADE, 1982].

Konkrete Vorhersagen werden nicht nur für Hochwasser vorgenommen, sondern auch für Niedrigwasser. In den meisten der beteiligten Ländern, wird dazu im Prinzip die gleiche Methode eingesetzt, wobei allerdings die angewandten Gleichungen nicht identisch sind. Der vorliegende Bericht beschränkt sich übrigens nahezu ausschließlich auf die Vorhersage von Hochwässern.

4. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES CORRESPONDANT AUX EXEMPLES DES CRUES D'AOÛT 1978 ET DE FÉVRIER 1980

La crue d'août 1978 fut provoquée essentiellement par des précipitations abondantes dans le bassin du Rhin en amont de Bâle. Le 7 août 1978 deux dépressions se formèrent, de part et d'autre des Alpes, dans des couches d'air proches du sol. En même temps un courant froid venant du nord régnait sur le côté septentrional des Alpes. Au-dessus de cet air froid, de l'air très chaud et humide se trouva entraîné depuis la Méditerranée. L'élévation de l'air chaud qui en résulta, provoqua, surtout entre 18h et 24h GMT, d'abondantes précipitations. Les hauteurs de pluie mesurées en 24 heures aux différentes stations pluviométriques de Suisse se classent dans de nombreux cas parmi les 10 plus fortes valeurs enregistrées depuis 1901. Compte tenu de son extension spatiale, cet événement pluvieux peut être considéré comme exceptionnel. Ces abondantes précipitations étaient imprévisibles, car au travers des données disponibles, le développement météorologique n'était pas défini avec une résolution spatiale et temporelle suffisante [GREBNER, 1980].

La fonte des neiges a contribué de façon essentielle à la crue de février 1980. Dans tout le bassin du Rhin, la couche de neige s'est formée à partir du 19 décembre 1979 environ. L'air chaud, venu précédemment d'ouest ou du sud-ouest, fut remplacé rapidement par un apport d'air froid venant de la Mer de Norvège. Par conséquent, l'isotherme de zéro degré descendit d'une altitude de 2000-2500 m jusque vers 0-600 m. Cette période de froid persista à quelques interruptions près – par exemple entre le 4 et le 7 et entre le 21 et le 26 janvier – jusqu'au 29 janvier (fig. 4.1). Pendant la période de froid, le bassin du Rhin avait souvent subi l'influence de dépressions secondaires et de fronts. Plus particulièrement dans le bassin amont du Rhin moyen, des précipitations abondantes se produisirent surtout du 19 au 20.12.1979, 28 au 31.12.1979, 3 au 7.1.1980 et du 22 au 25.1.1980. A cause des basses températures, une couche de neige continue put se former au-dessus de 500 m jusqu'au 23 janvier 1980. Au-dessus de 1000 m elle avait plus de 50 cm et au-dessus de 2000 m plus de 200 cm d'épaisseur (fig. 4.2 a, b, c).

Dans la période du 22 au 25 janvier 1980, avec un fort courant d'ouest, l'isotherme de zéro degré s'élevait par moments jusqu'à 1500 m. Les précipitations tombèrent sous forme de pluie jusqu'à des altitudes d'environ 1000 m. A cause de la courte durée du réchauffement, seule une partie insignifiante de la couche de neige put fondre. Une partie de l'eau de fusion et de la pluie demeura absorbée dans la couche de neige, car le refroidissement rapide, dû à un apport d'air froid sur la bordure ouest d'une dépression centrée sur la Scandinavie, em-

4. METEOROLOGISCHE VERHÄLTNISSE ZU DEN HOCHWASSERBEISPIELEN VOM AUGUST 1978 UND FEBRUAR 1980

Das Hochwasser im August 1978 wurde hauptsächlich durch die Starkniederschläge im Rheineinzugsgebiet oberhalb Basel verursacht. Am 7. August 1978 entstand beidseits der Alpen in der bodennahen Luftschicht je ein Tiefdruckgebiet. Dabei herrschte auf der Alpennordseite eine kalte Nordströmung. Über diese Kaltluft wurde vom Mittelmeer her sehr warme und feuchte Luft geführt. Die dabei verursachte Hebung der Warmluft erzeugte vor allem zwischen 18h und 24h GMT außerordentliche Niederschlagsmengen. Die 24-stündigen Niederschlagssummen der Einzelstationen in der Schweiz reihen sich vielfach unter die 10 größten Ereignisse seit 1901. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der räumlichen Ausdehnung des Starkniederschlags kann von einem extremen Ereignis gesprochen werden. Die Starkniederschläge waren nicht vorhersagbar, da die meteorologische Entwicklung in den Unterlagen zeitlich und räumlich nicht genügend erfaßt wurde [GREBNER, 1980].

Das Hochwasser vom Februar 1980 wurde durch Schneeschmelze wesentlich mitbestimmt. Der Aufbau der beteiligten Schneedecke begann im gesamten Rheingebiet etwa am 19. Dezember 1979. Die zuvor vom West bis Südwest zugeführte, z.T. sehr warme Luft wurde durch einen Kaltluftvorstoß vom europäischen Nordmeer her rasch ersetzt. Dabei sank die Nullgrad-Grenze von 2000-2500 m auf 0-600 m ü.M. ab. Diese Kälteperiode hielt mit wenigen Unterbrechungen – z.B. zwischen dem 4. und 7. und zwischen dem 21. und 26. Januar – bis zum 29. Januar an (Abb. 4.1). Während der Kälteperiode kam das Rheineinzugsgebiet häufig in den Einflußbereich von Rand-Tiefdruckgebieten und Fronten. Dabei fielen vor allem an den Tagen 19. und 20.12.1979, 28. bis 31.12.1979, 3. bis 7.1.1980 und 22. bis 25.1.1980 besonders im Einzugsgebiet oberhalb des Mittelrheins verbreitet ergiebige Niederschläge. Wegen der tiefen Temperaturen konnte sich bis zum 23. Januar 1980 oberhalb 500 m ü.M. eine geschlossene Schneedecke aufbauen. Sie war oberhalb 1000 m ü.M. mehr als 50 cm und oberhalb 2000 m ü.M. mehr als 200 cm dick (Abb. 4.2 a, b, c).

In den Tagen vom 22. bis 25. Januar 1980 stieg die Nullgrad-Grenze während einer starken Westströmung zeitweise bis auf 1500 m ü.M. an. Die Niederschläge fielen bis in Höhen um 1000 m ü.M. als Regen. Wegen der kurzen Dauer der Erwärmung konnte aber nur ein geringer Teil der Schneedecke abgeschmolzen werden. Ein Teil des Schmelzwassers und des Regens blieben in der Schneedecke, da die rasche Abkühlung durch einen Kaltluftvorstoß am Westrand eines skandinavischen Tiefdruckgebietes ein weiteres Schmelzen und damit

pêchait une fusion prolongée de la neige et par conséquent l'écoulement de l'eau liquide.

das Ausfließen des flüssigen Wassers aus der Schneedecke verhinderte.

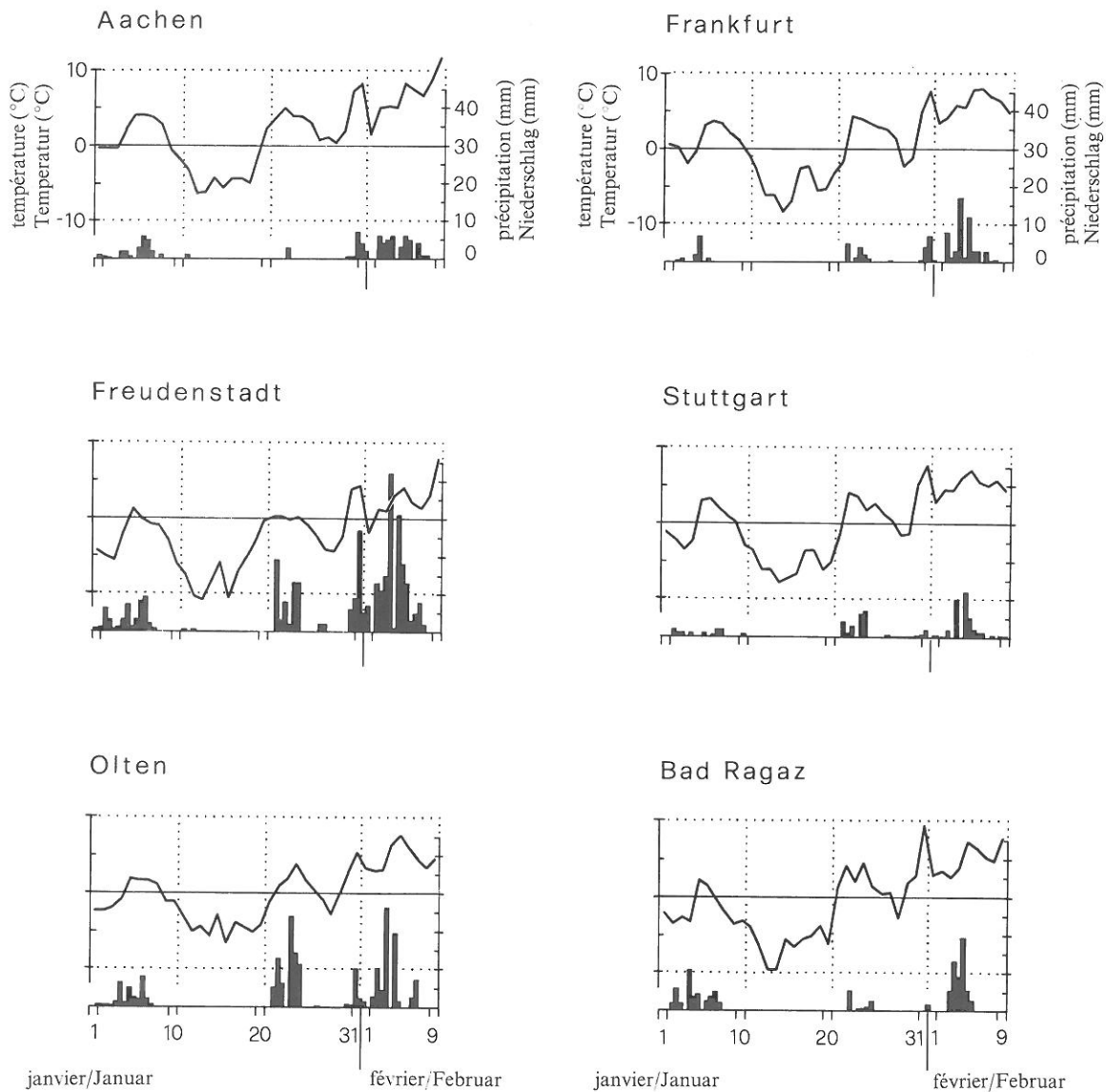


Fig. 4.1 Température journalière moyenne et hauteurs des précipitations sur 12 heures (6h-12h, 18h-6h GMT) du 1.1. au 9.2.1980, représentées pour les 6 stations: Aix-la-Chapelle (202 m), Francfort aéroport (112 m), Stuttgart aéroport (396 m), Freudenstadt (797 m), Olten (413 m) et Bad Ragaz (510 m)

Abb. 4.1 Tagesmitteltemperatur und 12-stündige Niederschlagssummen (6h-12h, 18h-6h GMT) vom 1.1. bis 9.2.1980, dargestellt für die 6 Stationen: Aachen (202 m ü.M.), Frankfurt Flughafen (112 m ü.M.), Stuttgart Flughafen (396 m ü.M.), Freudenstadt (797 m ü.M.), Olten (413 m ü.M.) und Bad Ragaz (510 m ü.M.)

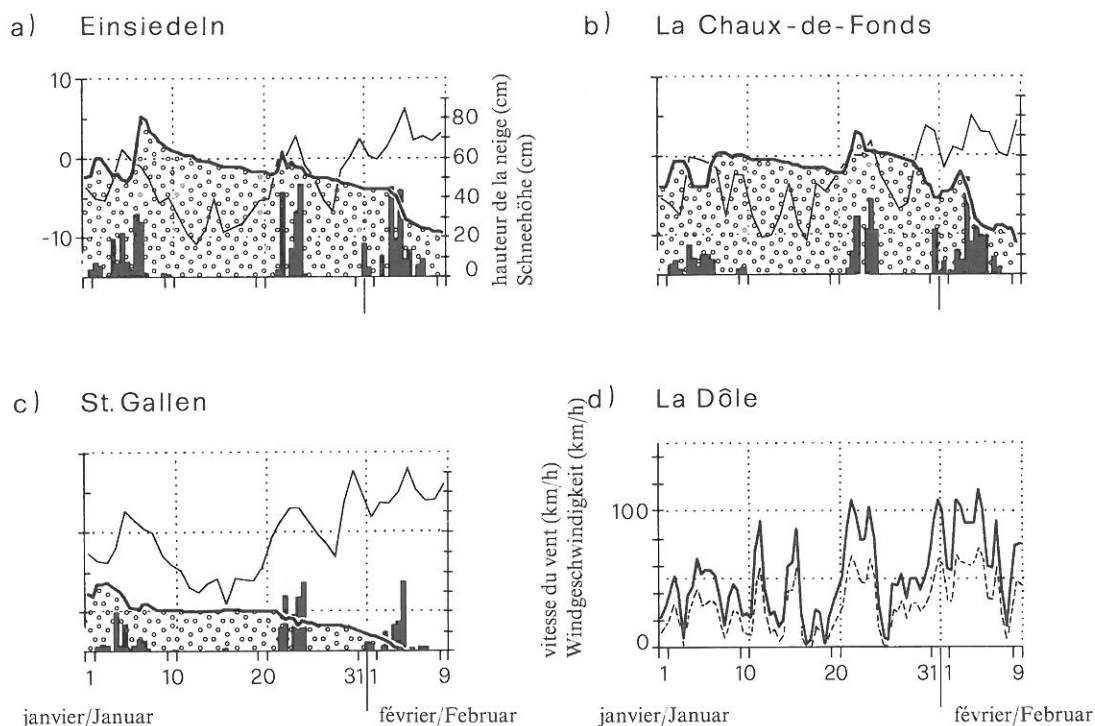


Fig. 4.2. a-c, ligne grasse: Hauteurs de la neige du 1.1. au 9.2.1980 pour les stations d'Einsiedeln (910 m), de la Chaux-de-Fonds (1018 m) et de St. Gallen (670 m); ligne maigre et colonnes: Température journalière moyenne et hauteurs de précipitations sur 12 heures (représentation comme à la fig. 4.1); d, ligne grasse: Moyenne des pointes (par heure) des rafales (km/h) sur 12 heures pour la station de mesure de la Dôle (1670 m); ligne maigre: Vitesse moyenne du vent (km/h) sur 12 heures pour la station de mesure de la Dôle

Abb. 4.2. a-c, dicke Linie: Verlauf der Schneehöhe vom 1.1. bis 9.2.1980 für die Stationen Einsiedeln (910 m ü.M.), La Chaux-de-Fonds (1018 m ü.M.) und St. Gallen (670 m ü.M.); dünne Linie und Säulen: Tagesmitteltemperatur und 12-stündige Niederschlagssummen (Darstellung wie in Abb. 4.1); d, dicke Linie: 12-stündiges Mittel über die stündlich größten Böenspitzen (km/h) für die Meßstation La Dôle (1670 m ü.M.); dünne Linie: 12-stündiges Mittel der Windgeschwindigkeit (km/h) für die Meßstation La Dôle

L'évolution du temps, déterminante pour la crue de février, a commencé presque simultanément dans tout le bassin du Rhin, le 30 janvier 1980. La dépression au-dessus de la Scandinavie s'était renforcée et se déplaça vers la Norvège. En même temps le coin de haute pression, à l'ouest de l'Europe, avait diminué. Par conséquent, dans les jours suivants, un courant très fort venant de l'ouest se produisit au-dessus du bassin du Rhin. Les vitesses du vent dépassaient par moments 100 km/h, en terrain découvert (fig. 4.2.d). Entraînées par ce courant, des zones dépressionnaires vinrent du Sud du Groenland, en traversant les Pays-Bas, vers l'est, dans les couches plus basses de la troposphère.

Die entscheidende Wetterentwicklung für das Hochwasser im Februar begann im gesamten Rheineinzugsgebiet fast gleichzeitig am 30. Januar 1980. Das Tief über Skandinavien hatte sich verstärkt und war nach Norwegen zurückgewichen. Gleichzeitig war der Hochkeil westlich von Europa abgebaut worden. Dadurch ergab sich in den folgenden Tagen über dem Rheingebiet eine sehr starke westliche Strömung. Die Windgeschwindigkeiten überschritten in freien Lagen zeitweise 100 km/h (Abb. 4.2.d). Mit dieser Strömung wurden in den tieferen Schichten der Troposphäre in rascher Folge Tiefdruckgebiete von Südgrönland über den Niederlanden nach Osten geführt. Ihr Abstand be-

L'intervalle entre elles n'était que d'environ 24 heures. Les systèmes frontaux, qui en faisaient partie, traversaient le bassin du Rhin accompagnés de précipitations abondantes. Les précipitations atteignirent, du 30.1 au 7.2.1980 et surtout dans la région du Rhin supérieur, souvent plus de 100 mm. Dans les secteurs chauds, l'isotherme de zéro degré dépassa pendant une courte durée une altitude de 2000 m. Les pluies qui tombaient également jusqu'à une altitude de 2000 m, furent d'abord absorbées par la couche de neige. Les rechauffements répétés provoquèrent finalement la fonte de la couche de neige, saturée de pluie, jusqu'à une altitude de 1700 m. Au-dessous de 1000 m la couche de neige fondit le plus souvent entièrement. La fonte de neige la plus intense eu lieu entre les 2 et 5 février, donc au moment même où les précipitations étaient maximales. Pendant cette période, l'épaisseur de neige s'est réduite de 30 cm. Comme l'affaissement de la couche de neige avait déjà commencé pendant les jours chauds précédants, la réduction de l'épaisseur de la neige entre 500 et 1500 m d'altitude peut être considérée comme fonte de neige. Une couche de neige fondue de 10 cm produisant alors de 30 à 35 mm de lame d'eau. L'intensité du processus de fusion fut accrue du fait qu'avec des vitesses du vent élevées et une forte humidité de l'air, la vapeur d'eau continue dans l'air condensait à la surface de la neige et que la chaleur de condensation ainsi libérée contribuait à la fonte. Au 31 janvier, le sol était déjà saturé d'eau. Par conséquent, on peut supposer que la plus grande partie des précipitations et de l'eau de fonte, s'est écoulee sans grand retard.

trug nur etwa 24 Stunden. Die dazugehörigen Frontsysteme zogen, von ergiebigen Niederschlägen begleitet, über das Rheineinzugsgebiet hinweg. Die Niederschlagsmengen erreichten vom 30.1. bis zum 7.2.1980 vor allem im Bereich des Hoch- und Oberrheins vielfach über 100 mm. In den Warmsektoren stieg die Nullgrad-Grenze kurzfristig auf über 2000 m ü.M. Der Regen, der dabei ebenfalls bis in eine Höhe von 2000 m. ü.M. auftrat, wurde zunächst von der Schneedecke aufgenommen. Die wiederholten Erwärmungen verursachten schließlich das Schmelzen der mit Regen gesättigten Schneedecke bis in einer Höhe von 1700 m ü.M. Unterhalb 1000 m ü.M. schmolz die Schneedecke meist vollständig ab. Die intensivste Schneeschmelze trat zwischen dem 2. und 5. Februar auf, also gleichzeitig mit dem Maximum der Niederschläge. In dieser Zeitspanne betrug die Reduktion der Schneehöhe bis zu 30 cm. Da die Setzung der Schneedecke schon in den warmen Tagen davor eingetreten war, kann die Reduktion der Schneehöhe im Bereich von 500 bis 1500 m ü.M. als Schneeschmelze angesehen werden. Eine geschmolzene Schneeschicht von 10 cm lieferte dabei 30 bis 35 mm Wasser. Die Intensität des Schmelzvorganges wurde dadurch gesteigert, daß bei hohen Windgeschwindigkeiten und hoher Luftfeuchtigkeit Wasserdampf der Luft an der Schneeoberfläche kondensierte und die frei werdende Kondensationswärme zur Schneeschmelze beitrug. Der Boden war nach dem 31. Januar wassergesättigt. Deshalb ist anzunehmen, daß der größte Teil der Wassermenge aus Niederschlag und Schneeschmelze ohne große Verzögerung zum Abfluß kam.

5. DESCRIPTION ET UTILISATION DES MODÈLES DE PRÉVISION

5.1 RHEINFELDEN

5.1.1 Description du modèle, état de la question en 1987

5.1.1.1 Prévission à court terme

La prévission à court terme du débit du Rhin se calcule à l'aide d'un modèle détaillé du bassin versant. Ce modèle a été développé à partir de 1976 par la Division hydrologie de l'Institut de géographie de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich et ce modèle est utilisé dans l'état actuel de son développement pour la prévission opérationnelle des débits à Rheinfelden. La figure 5.1.1 donne des exemples de prévission émises à l'aide du modèle en question.

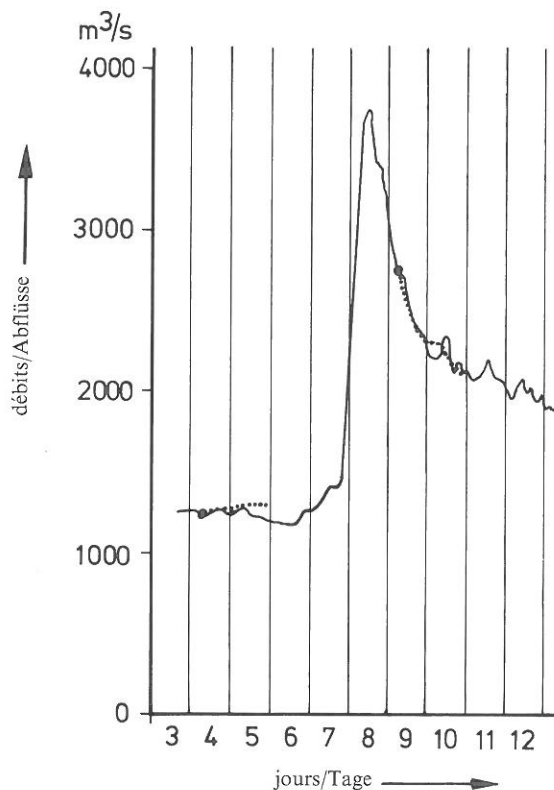


Fig. 5.1.1 Hydrogramme de la crue du Rhin à Rheinfelden du mois d'août 1978. Prévissions de la VAW des 4, 7, 8, 9 et 11 août comparées aux débits observés (pour éviter des superpositions, le diagramme a été scindé en deux)

5. BESCHREIBUNG DER VORHERSAGEMODELLE UND IHRE ANWENDUNG

5.1 RHEINFELDEN

5.1.1 Modellbeschreibung, Stand 1987

5.1.1.1 Kurzfristvorhersagen

Die kurzfristige Vorhersage des Abflusses am Rhein wird mit Hilfe eines detaillierten Flußgebietmodells berechnet. Dieses Modell wurde seit 1976 an der Abteilung Hydrologie des Geographischen Institutes der ETH Zürich entwickelt und in seinem jeweiligen Zustand für die operationelle Vorhersage des Abflusses bei Rheinfelden benutzt. In Abbildung 5.1.1 sind Beispiele ausgegebener Vorhersagen dargestellt.

Rhin/Rheinfelden
Août 1978

Rhein/Rheinfelden
August 1978

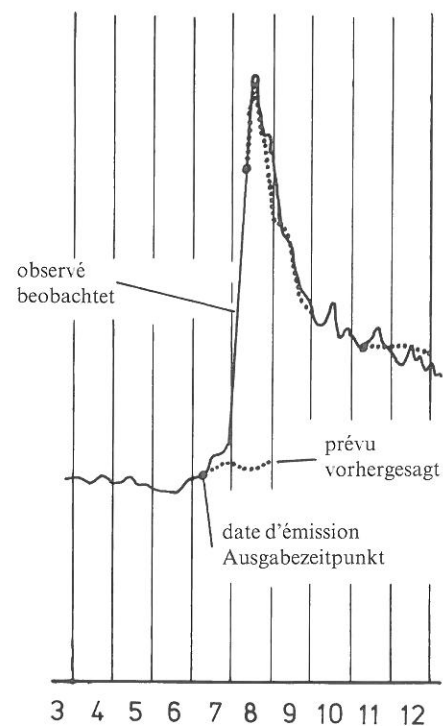


Abb. 5.1.1 Hochwasservorhersage vom August 1978 bei Rheinfelden. Ausgegebene Vorhersagen am 4., 7., 8., 9. und 11. August im Vergleich zum beobachteten Abfluß (Vorhersagen zwecks Vermeidung von Überlappungen auf zwei Figuren verteilt).

a) *Pratique actuelle de la prévision*

La prévision est élaborée journalièrement vers 09.00h; elle couvre la période s'achevant à 24.00h le surlendemain. A noter que depuis 1986, c'est le Service hydrologique et géologique national à Berne qui s'en charge.

Pour les journées où on ne prévoit pas de variations de débit importantes, la prévision détaillée est remplacée par un bref commentaire.

Les messages de prévision sont transmis par télex aux destinataires suivants:

- Electricité de France, Grenoble;
- Institut fédéral d'hydrologie, Coblenz;
- Compagnie de navigation suisse Neptun A.G.

En pratique, les prévisions reposent sur les données de départ suivantes, connues au moment du calcul:

- I) données observées de la période antérieure:
 - valeurs instantanées bi-horaires relevées en 26 stations limnimétriques (la plupart avec débit);
 - hauteurs de précipitation horaires relevées par 41 stations météorologiques automatiques;
 - hauteurs de précipitations bi-quotidiennes relevées par 40 stations climatiques;
 - température de l'air et hauteur de neige relevées par les 40 stations climatiques.
- II) prévisions quantitatives des précipitations et de température élaborées par l'Institut suisse de météorologie à Zürich.

La circulation des informations transmises entre les divers appareils mis en oeuvre est représentée à la fig. 5.1.2.

b) *Structure du modèle de prévision*

L'ensemble du bassin versant du Rhin à Rheinfelden est subdivisé en bassins partiels, un bassin correspondant à chaque station hydrométrique (niveau ou débit) à répondeur téléphonique automatique installée sur le Rhin, un affluent ou un lac. Pour chaque bassin, on élabore une prévision particulière, en commençant par les bassins les plus élevés, c'est-à-dire par ceux qui n'incluent pas eux-mêmes d'autres bassins élémentaires.

Le débit prévu pour un bassin partiel devient une des variables influençant le modèle de prévision partiel de la station située directement en aval, au même titre que les données météorologiques du bassin versant intermédiaire.

a) *Heutiger Stand der operationellen Vorhersage*

Die Vorhersage wird täglich um ca. 09.00 Uhr erstellt und erstreckt sich bis zum 2. Folgetag 24.00 Uhr. Sie wird seit 1986 von der Landeshydrologie und -geologie erarbeitet und verteilt.

An Tagen mit voraussehbar wenig Abflußänderung wird anstelle einer ausführlichen Prognose lediglich ein kurzer Kommentar ausgegeben.

Die Vorhersagen werden per Telex an folgende Empfänger übermittelt:

- Electricité de France, Grenoble;
- Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz;
- Schweizer Schiffahrtsgesellschaft Neptun A.G.

Die operationelle Vorhersage stützt sich auf die folgenden, zum Zeitpunkt der Prognoseausgabe bekannten Ausgangsgrößen:

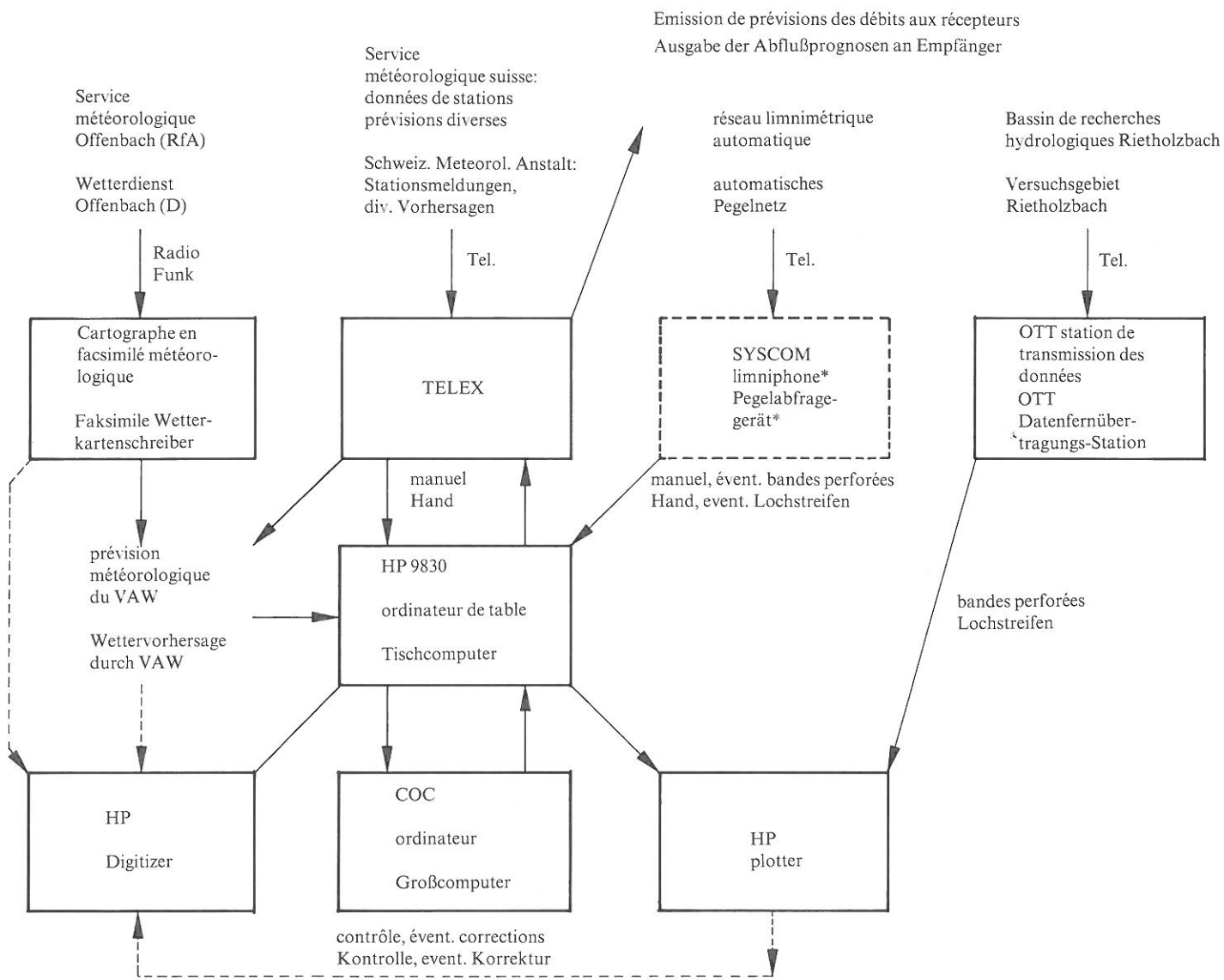
- I) beobachtete Größen der Vorperiode:
 - 2-stündliche Momentanwerte an 26 automatischen Pegel- bzw. Abflußstationen;
 - stündliche Niederschlagssummen an 41 automatischen Klimastationen;
 - halbtägliche Niederschlagssummen an 40 Klimastationen;
 - Lufttemperatur und Schneehöhen an 40 Klimastationen.
- II) von der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt in Zürich erstellte quantitative Niederschlags- und Temperaturprognosen.

Der Informationsfluß innerhalb der für die Vorhersage eingesetzten Geräte ist in Abbildung 5.1.2 dargestellt.

b) *Aufbau des Vorhersagemodelles*

Das gesamte Einzugsgebiet wird unterteilt in die Einzugsgebiete der Flüsse und Seen an den automatischen (d.h. telefonisch abrufbaren) Abfluß- bzw. Pegelstationen. Für jedes dieser Teilgebiete wird eine eigene Abflußvorhersage erstellt, wobei mit den obersten Gebieten begonnen wird, d.h. mit denjenigen, die selbst keine weiteren Teilgebiete mehr enthalten.

Der vorhergesagte Abfluß eines jeden Teilgebietes geht als Einflußgröße ein in das Vorhersagemodell der nächsten flußabwärts gelegenen Station, zusammen mit den meteorologischen Größen des Zwischengebietes.



* Equipement est actuellement contrôlé par le PTT.

* Gerät wird zur Zeit von der PTT abgenommen.

Fig. 5.1.2 Circulation de l'information et parc du matériel mis en oeuvre pour l'édition opérationnelle des prévisions à court terme du débit du Rhin à Rheinfelden

Abb. 5.1.2 Informationsfluß und Geräte bei der Ausgabe kurzfristiger Abflußvorhersagen für den Rhein bei Rheinfelden

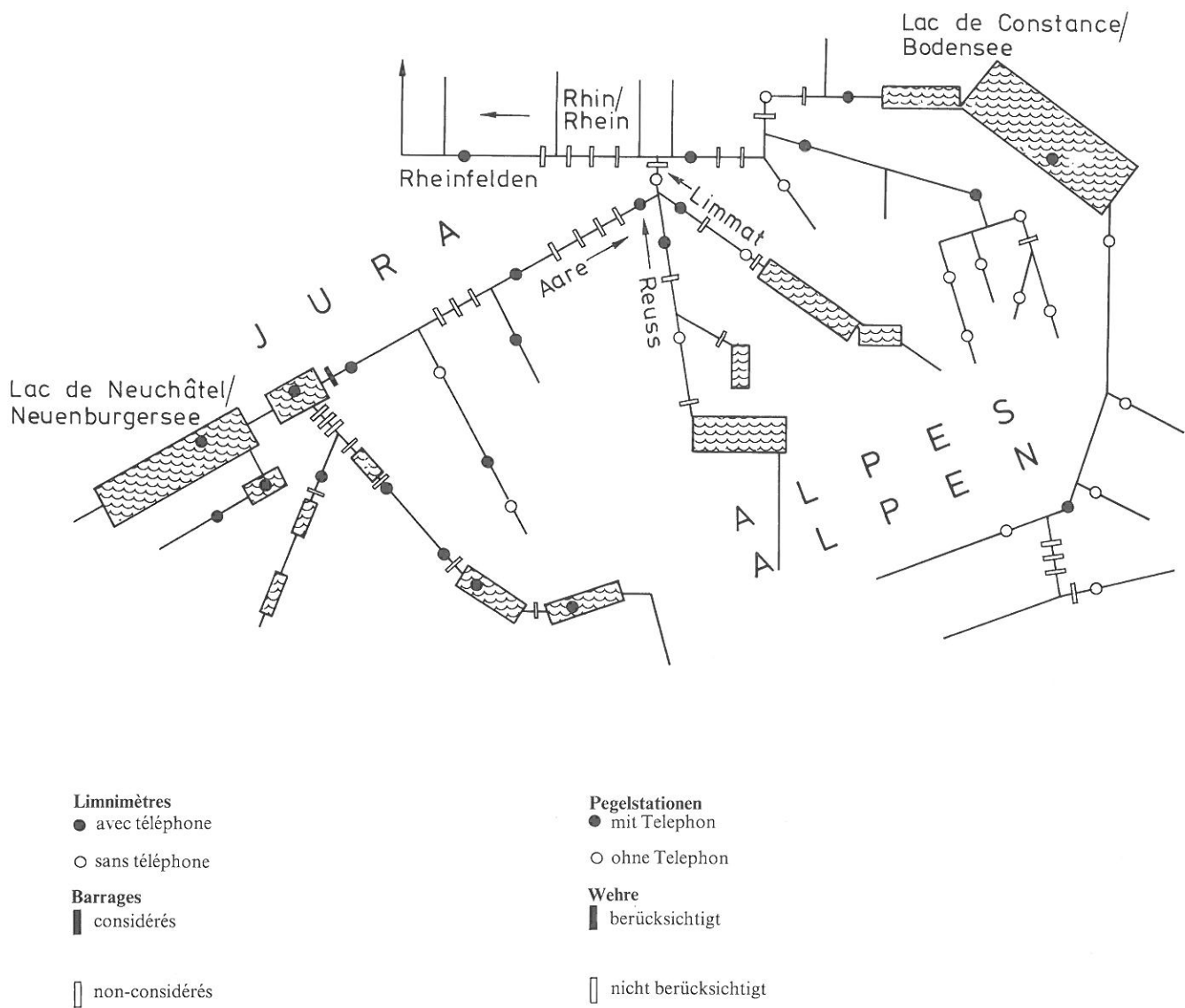


Fig. 5.1.3 Réseau hydrographique du modèle de prévision

Abb. 5.1.3 Gewässernetz des Vorhersagemodelles

La figure 5.1.3 représente schématiquement le réseau fluvial avec les stations hydrométriques. Il est à noter que, grâce à leur capacité de rétention, les lacs péri-alpins subdivisent nettement ce bassin en une région alpine et une autre région, de caractère non alpin, située sur le Plateau suisse.

Eine Übersicht über das System der Flüsse, Seen und Pegelstationen gibt das in Abbildung 5.1.3 dargestellte Schema. Speziell muß hervorgehoben werden, daß die Alpenrandseen dank ihrem Retentionsvermögen den alpinen Teil deutlich von dem im Mittelland gelegenen nichtalpinen Teil des gesamten Einzugsgebietes trennen.

Cette dernière région est subdivisée à son tour par les trois lacs situés à la périphérie sud du Jura.

c) Prévisions des débits collectés par les lacs péri-alpins

La rétention des lacs est prise en compte par la formule de rétention bien connue:

$$F(H,t) \cdot \frac{dH(t)}{dt} \cdot Z(t) - A(H,t) = 0$$

avec:

- F = superficie du lac;
- H = niveau du lac;
- Z = débit entrant;
- A = débit sortant;
- t = temps.

Cette formule satisfait à un double but: elle permet d'une part de déterminer le débit entrant de la période antérieure (période de référence, période d'étalonnage) à partir du débit sortant à cette période et de la variation de niveau du lac; elle permet d'autre part de convertir de manière simple la prévision du débit entrant en prévision du débit sortant.

La superficie du lac et la précision limitée de la mesure des niveaux ne permettent pas de choisir pour la détermination du débit entrant des pas de temps aussi courts que l'on veut. Pour les grands lacs, le plus petit pas de temps qui ait encore un sens est de l'ordre de 6h. La fonte de neige est prise en compte par la relation suivante:

$$S = \text{Minimum}_{\text{von}} (a_1 T_1 + a_2 \cdot P_{\text{liqu}} \cdot T_2 \text{ et } WE)$$

où T_1 et T_2 sont les écarts positifs de la température au-dessus de valeurs de seuils fixées au mieux, a_1 et a_2 sont des paramètres constants, P_{liqu} représente les précipitations liquides et WE, l'équivalent en eau de la couche de neige. Pour la détermination de la fonte globale, cette expression doit être appliquée à chaque tranche d'altitude, en tenant compte de sa température et de sa couche de neige, une sommation du résultat de chaque tranche étant effectuée.

La quantité (S) »fonte des neiges«, ainsi que les précipitations liquides sur le bassin considéré et les apports par écoulement de la période antérieure, sont introduits dans le modèle de prévision partielle. Ce modèle comporte une régression pour chaque intervalle de temps de 6h de la période de prévision.

d) Prévisions de débit pour le Plateau suisse

Compte tenu de la faible étendue des bassins versants partiels du plateau et des temps de réaction et de

Der letztere wird nochmals unterteilt durch die drei am Südrand des Juras gelegenen Seen.

c) Vorhersage des Zuflusses zu den Alpenrandseen

Die Seeretention wird mittels der bekannten Gleichung:

berücksichtigt wobei:

- F = Oberfläche des Sees;
- H = Pegelstand;
- Z = Zufluß;
- A = Abfluß;
- t = Zeit.

Diese Gleichung dient einerseits zur Bestimmung des Zuflusses in der Vergangenheit (Referenzperiode, Eichperiode) und in der der Vorhersageerstellung vorangehenden Periode, andererseits zur Berechnung der Vorhersage für den Abfluß aus dem vorhergesagten Zufluß.

Die Größe der Seeoberflächen und die beschränkte Genauigkeit der Pegelmessungen, läßt keine beliebig kurzen Zeitschritte bei der Bestimmung des Zuflusses zu. Für große Seen beträgt der kleinste noch sinnvolle Schritt etwa 6 Stunden. Zur Berücksichtigung der Schneeschmelze S wird folgender Ansatz gemacht:

wobei T_1 und T_2 die positiven Abweichungen der Temperatur von geeigneten Schwellenwerten, a_1 und a_2 konstante Parameter, P_{liqu} der flüssige Niederschlag und WE das Wasseräquivalent der Schneedecke bedeuten. Zur Bestimmung der globalen Schmelze wird dieser Ausdruck über die Verteilung der Temperatur und der Schneehöhe auf jeder Höhenstufe des Einzugebietes integriert.

Die Größe »Schneesmelze« (S) wird zusammen mit dem flüssigen Anteil des Gebietsniederschlags und mit den Zuflußwerten der Vorperiode in je eine separate Regressionsgleichung für alle 6-Stunden-Intervalle der gesamten Vorhersageperiode eingeführt.

d) Vorhersage des Abflusses im Mittelland

In Anbetracht der geringen Größe der Teileinzugsgebiete im Mittelland und der damit verbundenen

parcours relativement brefs qui leur sont associés (au mieux, ils sont de 12 à 18 heures), les modèles de prévision partielle sont exploités avec un pas de temps d'une heure.

e) Interpolation des précipitations

Pour l'interpolation spatiale des précipitations, chaque bassin élémentaire est subdivisé le long de son réseau hydrographique en sous-bassins de surface à peu près égales de l'ordre de 100 km².

A partir des relevés horaires des pluviographes, et des relevés bi-quotidiens des stations météorologiques, on détermine par interpolation optimale (krigeage) la hauteur de précipitation horaire au centre de gravité de chaque sous-bassin.

Dans l'opération d'interpolation, on tient également compte de la vitesse de progression des champs de précipitations au moyen de la procédure établie par [GREBNER et JENSEN, 1979].

f) Modèles de transformation pluies-débits

En définitive, les précipitations horaires des différents sous-bassins sont pondérées en fonction de la taille de l'élément, puis superposées en tenant compte des temps de parcours depuis le sous-bassin jusqu'à la station de jaugeage. La hauteur de précipitations ainsi calculée est introduite dans le modèle de prévision du bassin élémentaire sous la désignation de précipitation régionale N(t).

Après plusieurs essais, on a retenu le modèle de prévision décrit ci-dessous. On peut le représenter comme étant la somme de 4 termes, aboutissant à la prévision du débit moyen pendant l'intervalle de temps t à partir des débits observés précédemment Q(t-1), Q(t-2), etc. et d'autres grandeurs déterminantes (one step ahead forecast).

$$Q(t) = Q_B(t) + Q_N(t) + Q_Z(t) + Q_V(t)$$

Le premier terme de l'équation, correspondant à la prévision du débit de base du bassin intermédiaire, qui se présente sous la forme:

$$Q_B(t) = k_1 \cdot \frac{Q(t-1)}{1 + Q(t-1) / \sum_{j=1}^{k_2} Q(t-j)}$$

De cette manière, la prévision du débit de base décroît d'autant plus vite que le débit de base a été plus élevé dans l'intervalle t-1; inversement le gradient sera d'autant plus faible que le volume écoulé dans une période antérieure judicieusement choisie est plus élevé.

kurzen Reaktions- und Laufzeiten (sie betragen bestenfalls 12 bis 18 Stunden), wurden den Modellen 1-stündige Zeitschritte zugrundegelegt.

e) Interpolation des Niederschlages

Zur Interpolation des Niederschlages wird jedes Teileinzugsgebiet entlang seines Gewässernetzes weiter unterteilt in etwa gleichgroße »Flächenelemente« der Größenordnung 100 km².

Ausgehend von den stündlichen Niederschlagsmessungen der Pluviographenstationen und den halbtäglichen der Klimastationen wird der stündliche Niederschlag am Schwerpunkt eines jeden dieser Flächenelemente mittels optimaler Interpolation (Kriging) geschätzt.

Bei dieser Interpolation werden auch die Zuggeschwindigkeiten der Niederschlagsfelder berücksichtigt. Näheres findet sich in [GREBNER und JENSEN, 1979].

f) Niederschlag-Abflußmodelle

Die stündlichen Niederschläge, die für die verschiedenen Flächenelemente eines Teileinzugsgebietes berechnet worden sind, werden unter Berücksichtigung der Laufzeiten vom Flächenelement bis zur Abflußstation superponiert. Der auf diese Weise entstandene Niederschlag wird als »Gebietsniederschlag« N(t) in das Vorhersagemodell eingeführt.

Als Vorhersagemodell wurde nach verschiedenen Versuchen das nachfolgend beschriebene ausgewählt. Es kann als Summe von 4 Ausdrücken dargestellt werden und sagt den Abfluß der Zeit t voraus unter der Annahme, daß er bis zur Zeit t-1 bekannt ist (one step ahead forecast).

Der erste Term dieser Gleichung berücksichtigt den Basisabfluß des Zwischengebietes und hat die Form:

Mit diesem Hyperbel-Ansatz wird erreicht, daß die Voraussage des Basisabflusses umso stärker fällt, je höher der Abfluß zur Zeit t-1 ist; umgekehrt fällt sie umso schwächer, je größer das Abflußvolumen in der Vorperiode war.

Le deuxième terme représente la fraction des précipitations du bassin intermédiaire:

$$Q_N(t) = \sum_j \alpha_j \left(1 - \frac{k_3}{k_4 + Q(t-1)}\right) N(t-j)$$

Le terme entre parenthèses représente une pondération, en fonction du débit, comprise entre une limite inférieure et une limite supérieure, qui détermine la contribution des précipitations du bassin intermédiaire. C'est le débit lui-même qui est pris comme indice de saturation du sol. Cette méthode est basée sur une proposition faite par P. Guillot, Electricité de France.

Le troisième terme associe le débit sortant au débit mesuré, ou prévu, des affluents (flood routing); il est représenté sous forme linéaire:

$$Q_d(t) = \sum_j \beta_j \cdot Q_{zufl}(t-j)$$

Le quatrième terme peut être considéré comme terme autorégressif, puisqu'il rattache le débit à son propre passé:

$$Q_v(t) = \sum_j \tau_j \cdot Q(t-j)$$

L'introduction de cette relation a une double justification: d'une part elle permet d'économiser des paramètres (parsimonie), d'autre part elle offre une certaine possibilité de corrections d'erreurs sur les données ou sur certaines des hypothèses.

g) *Rétention des lacs à la périphérie sud du Jura*

Pour la prévision des apports aux lacs de la périphérie sud du Jura, on dispose actuellement d'un modèle provisoire. Un modèle partiel pour la prévision des débits à l'exutoire des lacs est en préparation actuellement à l'Institut de Géographie de l'EPF-Z. Le débit sortant des lacs est régularisé au moyen d'un barrage géré par l'Office de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne. La connaissance du règlement de régularisation utilisé dans ce modèle, ainsi que des contacts téléphoniques réguliers avec cet Office, permettent de prendre en compte la régularisation lors de la prévision du débit de l'Aare.

5.1.1.2 *Prévisions à long terme*

Une prévision à long terme du débit du Rhin à Rheinfelden est émise au début de chaque mois. Pendant la saison d'hiver, les prévisions portent sur deux mois; pendant la saison d'été, elles portent chaque mois sur la période, commençant par le mois en cours et se terminant par le mois de septembre. Chaque printemps, sont émises des prévisions analogues portant sur les apports estivaux aux différents réservoirs artificiels alpins.

Der Anteil des Niederschlages des Zwischengebietes wird vom zweiten Term dargestellt:

Der Klammerausdruck stellt ein nach oben wie nach unten beschränktes Gewicht als Funktion des Abflusses dar und bestimmt den Anteil des effektiven am totalen Niederschlag. Damit wird der Abfluß selbst als Maß für den Sättigungszustand des Bodens benutzt.

Der dritte Term verknüpft den Abfluß mit dem gemessenen oder vorhergesagten Abfluß der Zubringer (flood routing) und wurde in linearer Form gewählt:

Der vierte Term schließlich kann als autoregressiver Ansatz bezeichnet werden, denn er verknüpft den Abfluß mit der eigenen Vergangenheit:

Seine Einführung hat zwei Gründe: erstens ermöglicht er die Einsparung von Parametern (parsimony), zweitens stellt er eine gewisse Korrekturmöglichkeit für Fehler in den Daten wie in den Ansätzen dar.

g) *Retention der Seen am Südrand des Juras*

Für die Vorhersage des Zuflusses zu den drei Seen am Südrand des Juras ist zur Zeit erst ein sehr provisorisches Modell vorhanden. Zur Zeit wird am Geographischen Institut der ETH -Zürich an einem neuen Teilmodell für die Vorhersage des Abflusses aus den Seen gearbeitet. Der Abfluß aus den Seen wird vom Wasser- und Energiewirtschaftsamt des Kantons Bern mittels eines Wehres reguliert. Die Kenntnis der hierbei angewandten Reguliervorschriften und regelmäßige telefonische Kontakte mit diesem Amt, ermöglichen die Berücksichtigung der Regulierung bei der Vorhersage des Aare-Abflusses.

5.1.1.2 *Langfristprognosen*

Für den Rhein bei Rheinfelden wird zu Beginn jedes Monats eine langfristige Abflußvorhersage erstellt. Die Vorhersagen beziehen sich im Winterhalbjahr auf einen und auf zwei Monate, im Sommerhalbjahr auf alle mehrmonatigen Intervalle, die mit dem laufenden Monat beginnen und spätestens mit dem September enden. Entsprechende Vorhersagen werden im Frühling über die Sommer-Zuflüsse zu verschiedenen alpinen Stauseen gemacht.

L'édition des prévisions consiste à donner les trois valeurs qui sont dépassées avec une probabilité de 10, 50 ou 90%. Elles sont déterminées à partir d'analyses de régression, où interviennent, en fonction de la saison, les variables indépendantes suivantes:

- débits au moment de l'émission des prévisions;
- volume des lacs naturels (au moment de l'émission des prévisions);
- équivalent en eau de la neige (au moment de l'émission des prévisions);
- hauteurs de précipitations hivernales;
- débits cumulés d'hiver.

Des descriptions plus détaillées sont données dans VISCHER et JENSEN [1978] et JENSEN [1979] ou dans LANG, JENSEN et GREBNER [1987].

5.1.2. Les crues d'août 1978 et de février 1980 comme exemples d'utilisation

Sur le cours supérieur du Rhin, de sa source jusqu'à Rheinfelden, les débits sont prévus à l'aide du modèle décrit au chapitre 5.1.1. Ce modèle a été développé à l'aide des données des semestres d'été de la période de référence. Il est de ce fait intéressant de montrer le calcul de contrôle des crues les 7 et 8 août 1978 en comparaison avec la description qui suit, de la crue de février 1980 et aussi comme supplément à la figure n° 5.1.1 du chapitre 5.1.1 (fig. 5.1.4). Ce calcul repose sur la valeur de départ du débit (cercle) et sur les valeurs des débits antérieurs, ainsi que sur les débits mesurés des lacs et les précipitations enregistrées. Les débits à la sortie des lacs sont représentés dans la partie inférieure de la figure 5.1.4.

L'évolution de la crue du Rhin à Rheinfelden de février 1980 est présentée à la figure 5.1.5. Les prévisions actuelles des débits pendant la période considérée sont représentées par une ligne pointillée à partir de la date d'émission (indiquée par un cercle). La figure montre qu'en pratique, le calcul des débits au moyen du modèle mentionné ne s'effectuait alors que jusqu'à la fin du premier jour suivant la date d'émission. Cette restriction était due à la portée très limitée des prévisions météorologiques adéquates de nature quantitative. Comme il a déjà été démontré pour la crue d'août 1978 (cf. fig. 5.1.4), de telles restrictions n'existent pas pour le calcul à posteriori; ainsi la crue de février 1980 fut également vérifiée sans interruption à partir d'une seule valeur de départ (cercle) en vue du contrôle du modèle (cf. la ligne pointillée à la figure 5.1.6). La partie inférieure de la figure 5.1.6 montre de nouveau les débits sortant de 3 lacs. D'autre part, les hauteurs de précipitations sont indiquées chaque heure au-dessus de la ligne de base. Elles se composent des précipitations liquides me-

Die Vorhersagen bestehen in der Angabe jener drei Werte, die von der Zielgröße mit 10, 50 bzw. 90% Wahrscheinlichkeit überschritten werden. Sie werden aufgrund von Regressionsanalysen bestimmt, in denen je nach Jahreszeit als Einflußgrößen folgende Variablen auftreten:

- Abfluß zur Zeit der Prognosen-Ausgabe;
- Volumen der natürlichen Seen (zur Zeit der Prognosen-Ausgabe);
- Wasseräquivalent der Schneedecke (zur Zeit der Prognosen-Ausgabe);
- Winterniederschlagssumme;
- Winterabflußsumme.

Näheres kann der Literatur VISCHER und JENSEN [1978] und JENSEN [1979] entnommen werden oder LANG, JENSEN und GREBNER [1987].

5.1.2. Die Hochwasserereignisse vom August 1978 und Februar 1980 als Anwendungsbeispiele

Im obersten Teil des Rheins, von den Quellgebieten bis Rheinfelden wird der Abfluß des Rheins mit dem in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Modell vorhergesagt. Dieses Modell wurde anhand von Daten aus den Sommerhalbjahren der Referenzperiode entwickelt. Es ist deshalb interessant, zum Vergleich mit dem anschließend beschriebenen Hochwasser im Februar 1980 und als Ergänzung zu Abbildung 5.1.1 in Kapitel 5.1.1 die Nachkalkulation des Hochwassers vom 7. und 8. August 1978 vorzustellen (Abb. 5.1.4). Diese Nachkalkulation stützt sich auf den Ausgangswert des Abflusses (Kreis), auf weiter zurückliegende Abflußwerte, sowie auf gemessene Abflüsse der Seen und gemessene Niederschläge. Die Seeabflüsse sind im unteren Teil der Abbildung 5.1.4 dargestellt.

Den Verlauf des Hochwassers vom Februar 1980 im Rhein bei Rheinfelden gibt Abbildung 5.1.5 wieder. Die aktuellen Abflußvorhersagen während der gezeigten Periode sind vom jeweiligen, mit einem Kreis markierten Ausgangszeitpunkt an gestrichelt eingezeichnet. Die Darstellung läßt erkennen, daß mit dem erwähnten Modell der Abfluß früher nur bis zum Ende des ersten Folgetages vorausgerechnet wurde. Grund für diese Beschränkung war die sehr begrenzte Reichweite adäquater, quantitativer meteorologischer Prognosen. Wie schon beim Hochwasser vom August 1978 (Abb. 5.1.4) gezeigt, entfallen bei der Nachkalkulation derartige Einschränkungen; das Hochwasser vom Februar 1980 wurde somit zur Kontrolle des Modelles ebenfalls von einem einzigen Ausgangswert (Kreis) aus durchgehend nachgerechnet (in Abbildung 5.1.6 gestrichelt dargestellt). Im unteren Teil der Abbildung 5.1.6 sind wieder die gemessenen Abflüsse von 3 Seen eingezeichnet. Zusätzlich sind über der Grundlinie noch stündlich Wassersäulen aufgetragen. Sie setzen sich aus dem gemesse-

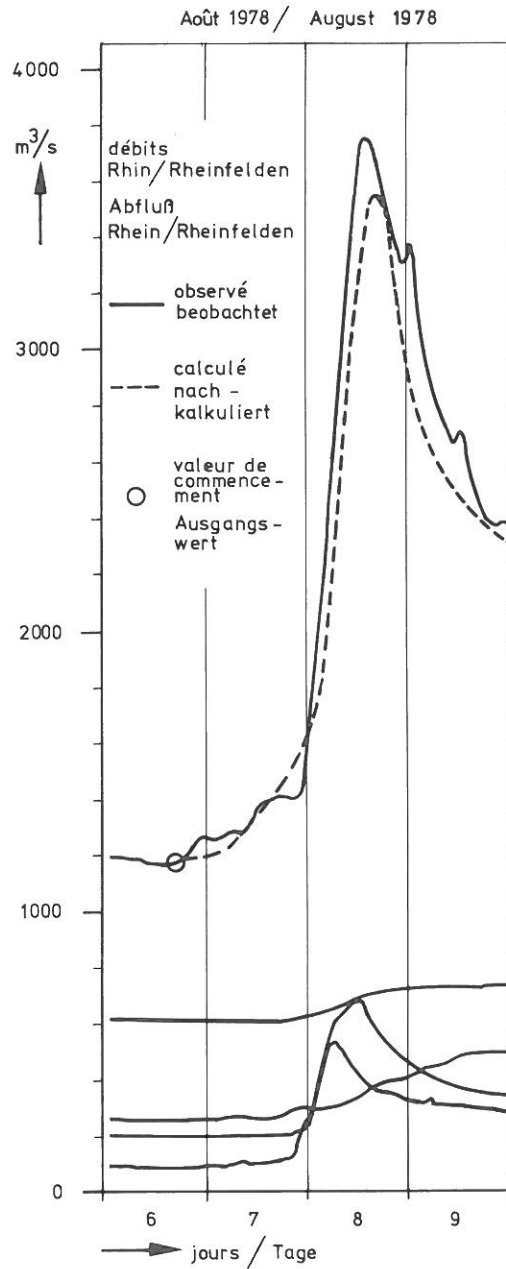


Fig. 5.1.4 Rhin/Rheinfelden: crue d'août 1978. Débits observés et calcul de contrôle basé sur les précipitations mesurées et les débits mesurés des plus grands lacs.

Abb. 5.1.4 Rhein/Rheinfelden: Hochwasser August 1978. Beobachteter Abfluß und Nachkalkulation ausgehend von den gemessenen Niederschlägen und den gemessenen Abflüssen der größten Seen.

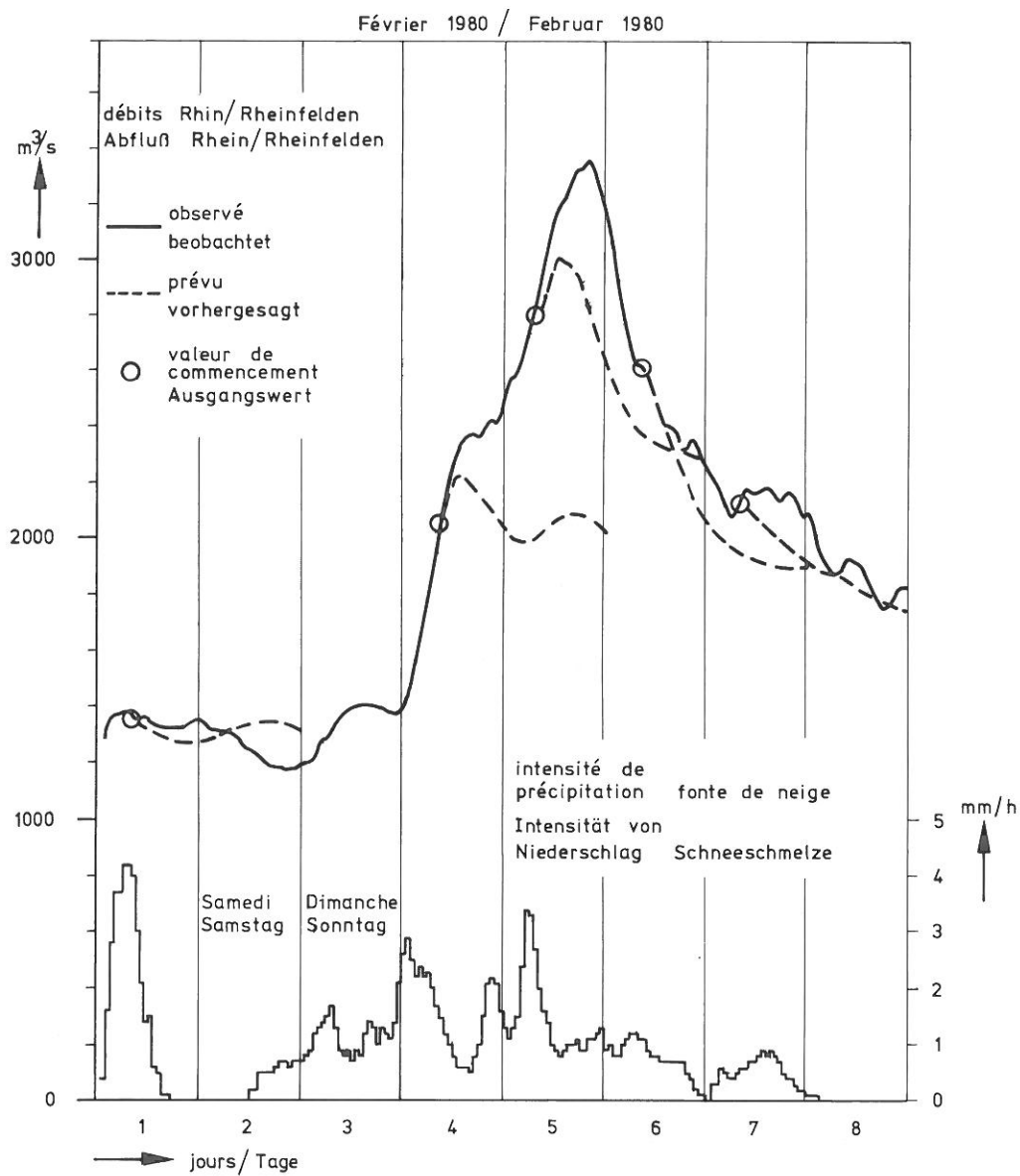


Fig. 5.1.5 Rhin/Rheinfelden: crue de février 1980. Débits observés et prévisions émises. Les prévisions commencent à environ 9h (valeurs encerclées) et étaient limitées à la fin du jour après la date d'émission. Pendant les jours du week-end, les 2 et 3 février, on n'a pas émis de prévisions.

Abb. 5.1.5 Rhein/Rheinfelden: Hochwasser Februar 1980. Beobachteter Abfluß und ausgegebene Vorhersagen. Die Prognosen beginnen etwa 9h (eingekreiste Werte) und erstrecken sich bis zum Ende des Folgetages. An den Wochenendtagen 2. und 3. Februar wurde keine Prognose ausgegeben.

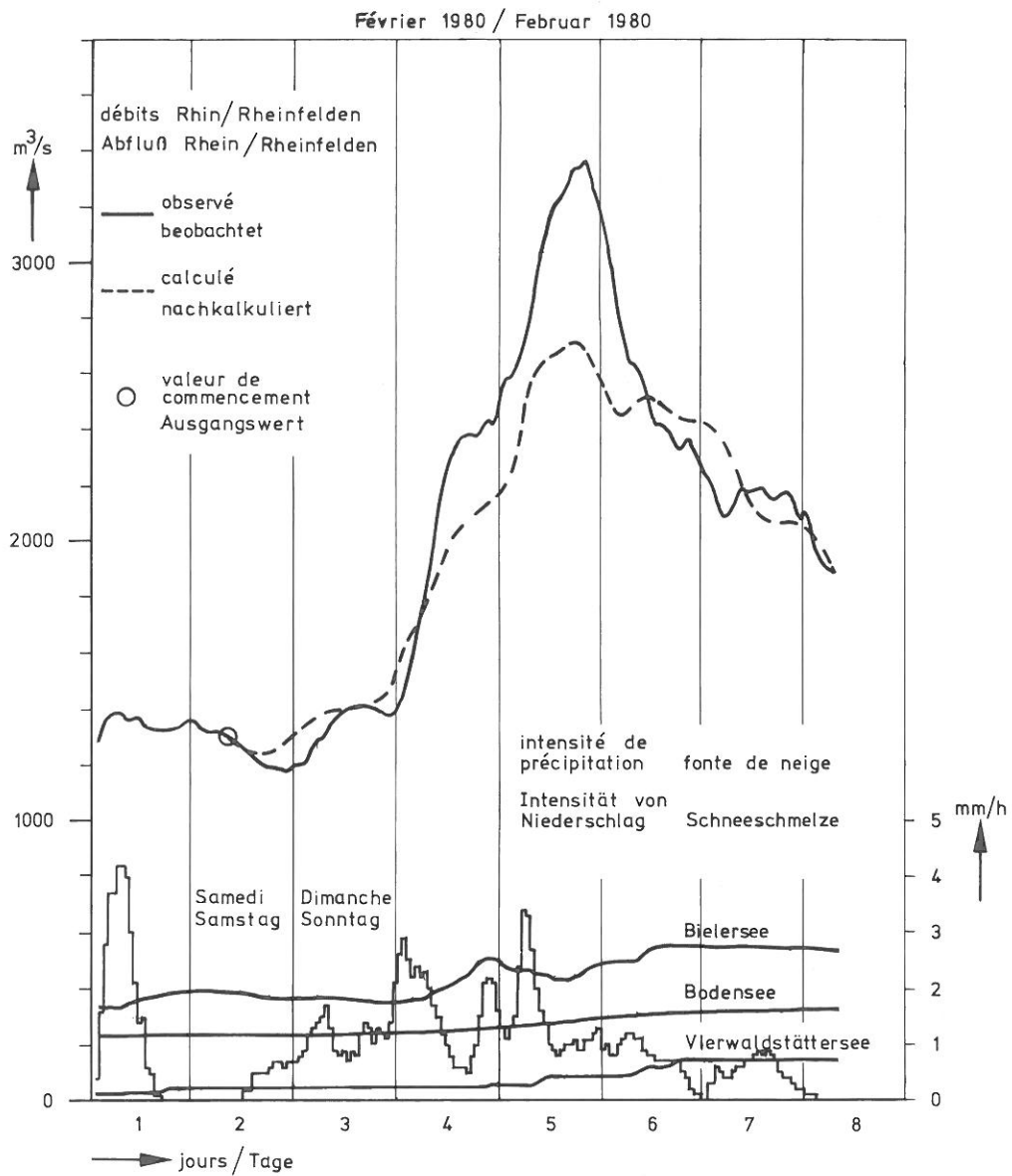


Fig. 5.1.6 Rhin/Rheinfelden: crue de février 1980. Débits observés et calcul de contrôle à partir: a) des prévisions mesurées, b) de la fonte de neige, estimée à l'aide des épaisseurs de neige et des températures mesurées et c) des débits observés aux exutoires de trois lacs.

Abb. 5.1.6 Rhein/Rheinfelden: Hochwasser Februar 1980. Beobachteter Abfluß und Nachkalkulation ausgehend von: a) den gemessenen Niederschlägen, b) der Schneeschmelze geschätzt aufgrund gemessener Schneehöhen und Temperaturen und c) den beobachteten Abflüssen von drei Seen.

surées et du taux maximum de fonte des neiges, calculé approximativement à partir des températures et des hauteurs de neige mesurées. Une comparaison de ce graphique en escalier avec l'hydrogramme montre bien les temps de propagation de courte durée, caractéristique pour le bassin jusqu'à Rheinfelden. Par conséquent, des prévisions des débits pour une période dépassant un jour nécessitent des prévisions quantitatives des précipitations. En présence d'une couche de neige, la quantité prévue de précipitations liquides, telle qu'elle est décrite à la figure 5.1.6, est augmentée, de la fonte des neiges dépendant de la température.

La figure 5.1.7 compare, séparément pour la partie occidentale et la partie orientale de la Suisse, les prévisions quantitatives des précipitations émises par la division Hydrologie dans la période du 31 janvier au 6 février 1980 et utilisées dans ce modèle de débits, y compris l'apport dû à la fonte des neiges et aux précipitations mesurées. Comme on peut le constater principalement dans le cas des précipitations du 1 au 6 février, non seulement la quantité de précipitations mais aussi les heures du début et de la fin des précipitations sont prévues.

Après ces remarques concernant les graphiques et l'émission actuelle des prévisions, les explications suivantes peuvent être données quant à la période représentée à la figure 5.1.5:

Prévisions des débits du 1.2.80: Après une augmentation des débits du 31.1.80 au 1.2.80 d'environ 300 m³/s, le modèle de prévisions de débits donnait une bonne prévision des faibles variations de l'hydrogramme jusqu'à la fin du 2.2.80, grâce à la prévision correcte des précipitations et de la fonte des neiges. L'écart minime entre la précipitation et la mesure des débits résulte de la méthode employée à ce moment-là, qui admettait la simultanéité des précipitations et de la fonte des neiges.

Pendant le week-end, du 2 au 3 février 1980, on n'a pas élaboré de prévisions.

Prévision des débits du 4 février 1980: Les prévisions des précipitations correspondaient à peu près aux valeurs mesurées. L'intensité de la fonte des neiges fut par contre sous-estimée. D'une part, la fonte des neiges qui se produisait fut négligée considérablement jusqu'à la date d'émission de la prévision, d'autre part, on peut dire que pour la période de prévision, la méthode utilisée des degrés-jours devrait aboutir à une quantité de fonte des neiges trop faible. Des vitesses du vent élevées (environ 100 km/h de 1000 à 5000 m.s.m.) et l'humidité atmosphérique élevée ont provoqué un transport considérable de chaleur latente dans la couche de neige. Cet apport supplémentaire provenant de la fonte des neiges et de l'eau de condensation n'a pas pu être déterminé

nen flüssigen Niederschlag und einer aus gemessenen Temperaturen und Schneehöhen näherungsweise berechneten maximalen Schmelzwasserrate zusammen. Ein Vergleich dieser Treppenkurve mit der Abflußganglinie macht die für das Einzugsgebiet bis Rheinfelden typischen kurzen Laufzeiten deutlich. Für Abflußvorhersagen über mehr als einen Tag werden deshalb quantitative Niederschlagsprognosen unerlässlich. Bei vorhandener Schneedecke wird die vorhergesagte flüssige Niederschlagsmenge, wie zu Abbildung 5.1.6 beschrieben, durch einen temperaturabhängigen Schmelzwasseranteil erhöht.

In Abbildung 5.1.7 sind die von der Abteilung Hydrologie im Zeitraum 31. Januar bis 6. Februar 1980 ausgegebenen und im Abflußmodell verwendeten quantitativen Niederschlagsprognosen, einschließlich vorhergesagtes Schmelzwasseranteils, dem gemessenen Niederschlag, für die westliche und die östliche Hälfte der Schweiz getrennt, gegenübergestellt. Wie vor allem bei den Niederschlagsprognosen vom 1. und 6. Februar deutlich zu erkennen ist, werden außer der Niederschlagsmenge auch die Zeiten von Anfang und Ende eines Niederschlages vorhergesagt.

Nach diesen Bemerkungen zu den Graphiken und zur aktuellen Prognoseausgabe läßt sich zu der in Abbildung 5.1.5 wiedergegebenen Periode folgendes erläutern:

Abflußprognose vom 1.2.80: Nach einem Anstieg der Abflußmenge vom 31.1.80 zum 1.2.80 um etwa 300 m³/s, bestimmte das Abflußmodell den wenig veränderten Verlauf der Ganglinie bis zum Ende des 2.2.80 anhand einer richtigen Vorhersage der Niederschlagsmenge mit Schmelzanteil richtig voraus. Die geringfügige Abweichung zwischen Vorhersage und Messung läßt sich darauf zurückführen, daß zum damaligen Verfahrensstand Niederschlag und Schneeschmelze zeitgleich gesetzt worden sind.

An den Wochenendtagen 2. und 3. Februar 1980 wurden keine Prognosen erstellt.

Abflußprognosen vom 4. Februar 1980: Die Niederschlagsvorhersage näherte die gemessenen Werte gut an. Demgegenüber wurde aber die Intensität der Schneeschmelze unterbewertet. Einerseits wurde die erfolgte Schneeschmelze bis zum Ausgabezeitpunkt der Prognose weitgehend vernachlässigt, andererseits ist rückwirkend zu erkennen, daß die verwendete Grad-Tag-Methode auch für die Vorhersageperiode eine zu geringe Schmelzwassermenge liefern mußte. Hohe Windgeschwindigkeiten (etwa 100 km/h in 1000 bis 5000 m ü.M.) und hohe Luftfeuchtigkeit sorgten für einen großen Transport latenter Wärme in die Schneedecke. Dieser zusätzliche Beitrag zur Schneeschmelze einschließlich des kondensierten Wassers konnte ohne

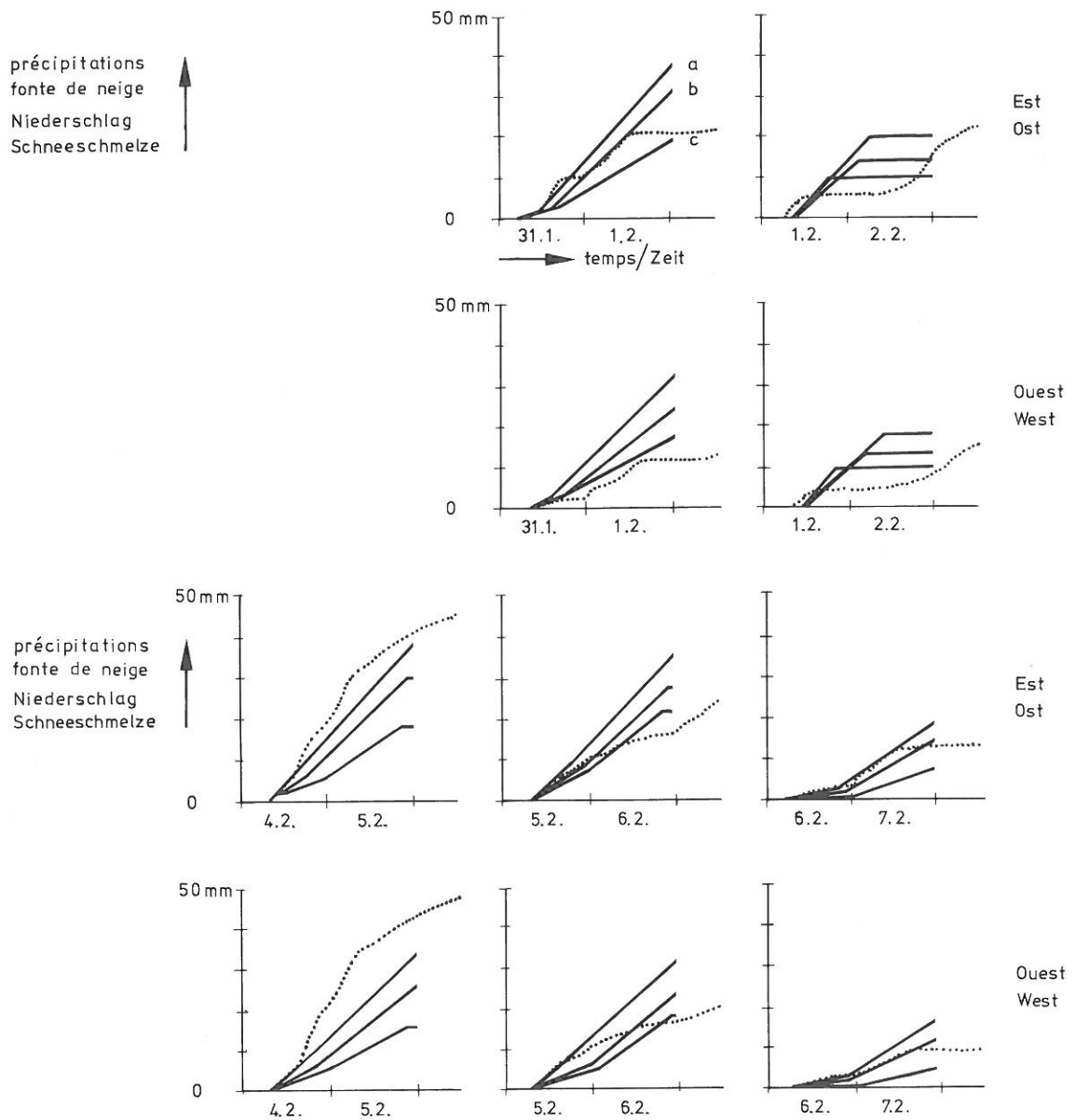


Fig. 5.1.7 Prévision: Précipitations + fonte de neige accumulées jusqu'à la fin du premier jour après la date d'émission (lignes continues); a) quantité maximum, b) quantité probable, c) quantité minimum.
Observé: Précipitations + fonte de neige calculée approximativement (ligne pointillée).
 Respectivement pour la partie occidentale et orientale de la Suisse du 31 janvier au 6 février 1980.

Abb. 5.1.7 Prognose: Niederschlag + Schmelzwasser akkumuliert bis zum Ende des ersten Folgetages (durchgezogene Linien); a) maximale Menge, b) wahrscheinliche Menge, c) minimale Menge.
Beobachtet: Niederschlag + näherungsweise berechnete Schneeschmelze (punktirierte Linie).
 Jeweils für die westliche und die östliche Hälfte der Schweiz, vom 31. bis 6. Februar 1980.

par un facteur degrés-jour indépendant du vent et de l'humidité. Ce sont surtout ces lacunes dans la prévision hydrométéorologique qui ont conduit à une prévision de débits trop basse.

Prévision des débits du 5 février 1980: Le modèle de prévision de débits prévoit une évolution de débits, correspondant approximativement aux valeurs réelles. Etant donné que les prévisions de précipitations et de fonte des neiges peuvent être considérées comme justes, le fait que l'hydrogramme prévu soit un peu trop bas doit être attribué essentiellement au fait d'avoir négligé la fonte de neige dans la nuit avant l'émission des prévisions.

Prévisions des débits du 6 et 7 février 1980: Ces prévisions peuvent être considérées comme correctes, dans toutes leur composantes.

wind- und feuchteabhängigen Grad-Tag-Faktor nicht erfaßt werden. Insbesondere diese Mängel in der hydro-meteorologischen Vorhersage bewirkten eine wesentlich zu niedrige Abflußprognose.

Abflußprognose vom 5. Februar 1980: Das Abflußmodell zeichnet den wahren Verlauf annähernd richtig voraus. Da auch Niederschlag und Schneeschmelze als richtig angesehen werden können, muß die etwas zu niedrig vorhergesagte Abflußkurve im wesentlichen auf die Vernachlässigung der Schneeschmelze in der Nacht vor der Prognosenausgabe zurückgeführt werden.

Abflußprognosen vom 6. und 7. Februar 1980: Diese Vorhersagen können in allen Komponenten als richtig angesehen werden.

5.2 ILL

5.2.1 Introduction

La prévision des crues de l'Ill s'inscrit dans le cadre plus général de l'Annonce des Crues qui est assurée par les deux Directions Départementales de l'Agriculture et de la Forêt. Un des objectifs de cette mission »Annonce des Crues« est en effet de prévoir, tant pour Colmar que pour le cours bas-rhinois de l'Ill, l'évolution des débits ou des hauteurs d'eau en périodes de crues à partir d'observations météorologiques et hydrologiques faites sur la partie amont de ce cours d'eau et sur ses principaux affluents. Ces observations font actuellement l'objet d'une importante modernisation technique, dont le financement est assuré pour un peu plus de la moitié par les Départements du Haut-Rhin et du Bas-Rhin pour le reste par l'Etat et l'Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse, et qui consiste en une automatisation des relevés de pluies, de température et de niveaux d'eau à 19 stations et une centralisation régulière des informations au niveau de 2 postes »centraux« situés aux Services d'Annonce des Crues de Mulhouse et de Strasbourg.

5.2.2. L'élaboration du modèle

En ce qui concerne la prévision des crues de l'Ill un premier modèle élaboré en 1977 par le C.T.G.R.E.F. (Centre Technique du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, devenu depuis le C.E.M.A.G.R.E.F. – Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts) uniquement pour la prévision des débits journaliers a été complété en 1979 par une prévision des débits instantanés pour différents délais: 6, 12, 18 et 24 h.

Toutefois la mise en oeuvre de cet »outil« de prévision (modèle »débits-débits«) a montré ultérieurement, et principalement au cours des crues exceptionnelles d'avril et mai 1983, qu'il n'était pas suffisamment fiable, surtout pour les délais les plus longs (18 et 24 h).

Une nouvelle modélisation a donc été décidée en 1984, portant à la fois sur une actualisation du calage avec les crues de 1983 et sur l'introduction d'autres variables que les débits, à savoir la pluie et la neige, qui jouent de toute évidence un rôle très important dans la genèse des crues en Alsace (surtout au niveau du massif Vosgien). Cette dernière étude a été financée par la Région Alsace avec une participation de l'Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse.

5.2 ILL

5.2.1 Einleitung

Die Hochwasservorhersage für die Ill paßt in den allgemeinen Rahmen der Hochwassermeldung, wofür die zwei Regierungsdirektionen für Land- und Forstwirtschaft zuständig sind. Eines der Ziele der Aufgabe »Hochwassermeldung« ist die Vorhersage der Abfluß- und Wasserstandsentwicklung während einer Hochwasserperiode am Pegel Colmar und für den Unterlauf der Ill; dabei geht man von meteorologischen und hydrologischen Beobachtungen am Oberlauf der Ill und an seinen wichtigsten Nebenflüssen aus. Diese Beobachtungen sind z.Z. Gegenstand einer beträchtlichen technischen Modernisierung, die aus einer Automatisierung der Niederschlags-, Temperatur- und Wasserstandsbeobachtung an 19 Stationen und aus einer planmäßigen Zentralisierung der Datenübertragung in zwei Zentralen (Hochwassermeldedienste in Mühlhausen und Straßburg) besteht. Die Durchführung dieser Modernisierung wird für gut die Hälfte von den Departements »Haut-Rhin« und »Bas-Rhin« bezahlt, der restliche Betrag geht auf Rechnung des Staates und der »Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse«.

5.2.2. Modellentwicklung

Ein erstes Modell der Ill wurde 1977 vom C.T.G.R.E.F. (»Centre Technique du Génie Rural, des Eaux et des Forêts«, jetzt C.E.M.A.G.R.E.F. »Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts«) ausschließlich für die Vorhersage der täglichen Abflüsse entwickelt. Es wurde 1979 ergänzt, um auch Abflüsse für verschiedene Vorhersagefristen (6, 12, 16 und 24 h) vorhersagen zu können.

Die Anwendung dieses Vorhersagemodelles (»Abfluß-Abfluß«) erwies sich jedoch vor allem während des außergewöhnlichen Hochwassers vom April und Mai 1983 im Bereich der langen Vorhersagefristen (18 und 24 h) als unzuverlässig.

1984 wurde deshalb die Entwicklung eines neuen Modelles beschlossen. Es basiert auf einer Aktualisierung des alten Modelles anhand der Hochwasserbeobachtungen von 1983; es werden neben Abflüssen noch Regen- und Schneedaten eingegeben. Bei der Entwicklung der Hochwasser im Elsaß spielen Niederschlagsdaten vor allem im Bereich des Vogesenmassives eine große Rolle. Diese letzte Studie wurde vom Bezirk Elsaß mit Beteiligung der »Agence Financière de Bassin Rhin-Meuse« finanziert.

5.2.3. Le modèle »pluie-(neige)-débit« de la prévision des débits de l'Ill à Colmar

La prévision des débits de l'Ill à Colmar (surface du bassin 1720 km²), n'étant pas satisfaisante pour le délai de prévision à 18 heures avec pour seuls prévisseurs les débits des stations amont, il est apparu nécessaire de prendre en compte l'information pluie. Le Massif Vosgien étant le principal réservoir d'eau de l'Ill, il était opportun de vérifier s'il était justifié de tenir compte d'un régime nival. Cela a fait l'objet de la première partie d'une étude du C.E.M.A.G.R.E.F. [CEMAGREF ANTONY, 1985], consacrée donc à la simulation des débits sur un bassin vosgien. Pour des raisons liées à une bonne représentation des mécanismes hydrométéorologiques de l'ensemble du bassin et à la présence de données climatologiques fiables, il a été retenu le bassin de la Thur à Willer. Ce bassin a une superficie de 159 km², en grande partie occupée par la forêt, quant à l'altitude, elle varie entre 400 et 1200 mètres. Les pluies les plus représentatives du bassin sont celles du poste de Kruth au centre du bassin. Les données collectées à ce poste sont des données journalières et, en conséquence, la simulation portera sur les débits journaliers. Les températures permettant de décrire au mieux la thermique du bassin concernent les stations de Sewen*-Lac d'Alfeld (620 m) et Sewen Grand Langenberg (915 m).

Un premier essai de modélisation, sur la base d'un seul module dont les mécanismes de fonte ou de formation de stock neigeux ne seraient régis que par une seule station thermométrique, n'a pas donné lieu à des simulations très performantes comme en témoigne la figure 5.2.1. On s'est alors orienté vers une modélisation basée sur la séparation en deux modules, comme le représente la figure 5.2.2. Le modèle C.R.E.C (Centre de Recherche d'EdF de Chatou) est de type déterministe qui a été adapté, amélioré par bon nombre de laboratoires et en particulier à la Division Hydrologie Hydraulique du CEMAGREF de Lyon.

* Sewen est le nom de la commune dans laquelle se trouvent les deux stations où sont effectués les relevés de températures moyennes journalières.

5.2.3. Das »Niederschlag-Abfluß«-Modell zur Abflußvorhersage der Ill am Pegel Colmar

Die Abflußvorhersage für die Ill am Pegel Colmar (Einzugsgebiet 1720 km²) mit ausschließlicher Benutzung von Abflüssen an Oberliegerpegeln, zeigte für eine Vorhersagefrist von 18 h unbefriedigende Ergebnisse. Es stellte sich heraus, daß die Einbeziehung von Niederschlagsdaten erforderlich war. Da das Vogesenmassiv der wichtigste Wasserspeicher für die Ill ist, war die Einbeziehung der Schmelzwasserrate notwendig. Dies war Gegenstand des ersten Teils einer Studie der C.E.M.A.G.R.E.F., welche der Abflußsimulation im Bereich der Vogesen gewidmet war [CEMAGREF ANTONY, 1985]. Wegen der günstigen hydrometeorologischen Repräsentativität für das gesamte Einzugsgebiet und wegen der Anwesenheit zuverlässiger klimatologischer Daten, wurde dafür das Einzugsgebiet der Thur bei Willer gewählt. Dieses hat eine Fläche von 159 km², wovon der größte Teil mit Wald bedeckt ist. Die Höhe variiert von 400 m bis 1200 m. Die an der Station Kruth im Zentrum des Einzugsgebietes erfaßten Niederschläge sind repräsentativ für das gesamte Einzugsgebiet. Es handelt sich um Tagessummen, so daß sich damit die Tagesabflüsse simulieren lassen. Die an den Stationen Sewen*-Lac d'Alfeld (620 m) und Sewen-Grand Langenberg (915 m) erfaßten Temperaturen beschreiben den Wärmehaushalt im Einzugsgebiet am besten.

Ein erster Modellversuch aufgrund eines einzigen Moduls für den Auf- und Abbau der Schneedecke mit den Daten an nur einer Temperatur-Meßstation ergab keine besonders guten Rechenergebnisse (siehe Abbildung 5.2.1). Daraufhin entwickelte man ein Modell, das auf zwei Teilmodulen basiert. Es ist in Abbildung 5.2.2 dargestellt. Das Modell C.R.E.C. (Centre de Recherche d'EDF de Chatou) ist ein deterministisches Modell, das von vielen Labors und vor allem von der »Division Hydrologie Hydraulique« des CEMAGREF in Lyon angepaßt und verbessert worden ist.

* Sewen ist der Name der Gemeinde wo sich die zwei Stationen befinden an denen die mittleren Tagestemperaturen gemessen werden.

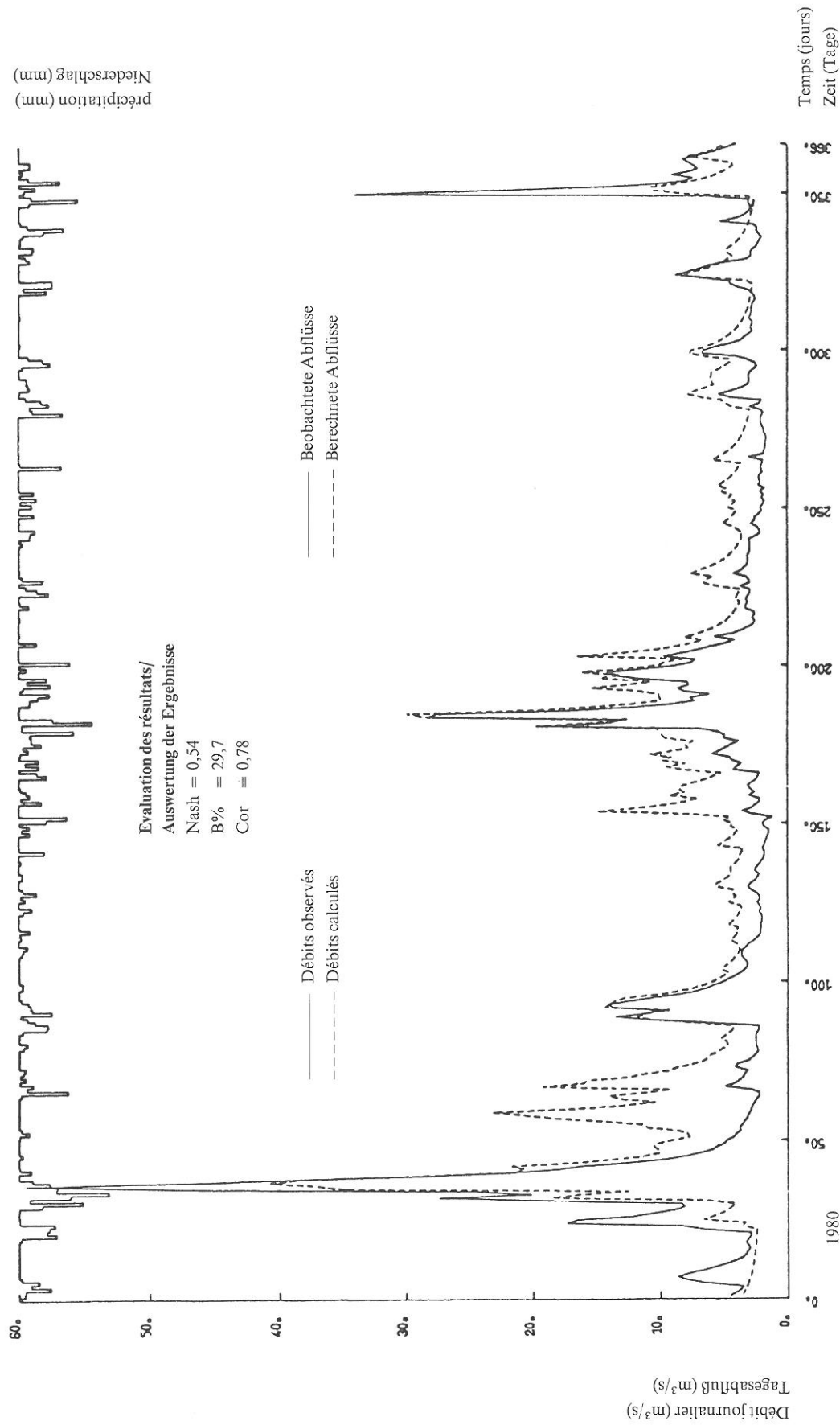


Fig. 5.2.1 Prise en compte du régime nival avec un seul module régi par un seul poste thermométrique (630 m)

Abb. 5.2.1 Berücksichtigung der Schneeschmelze aufgrund eines einzigen Moduls mit den Daten an nur einer Temperatur-Meßstation (630 m)

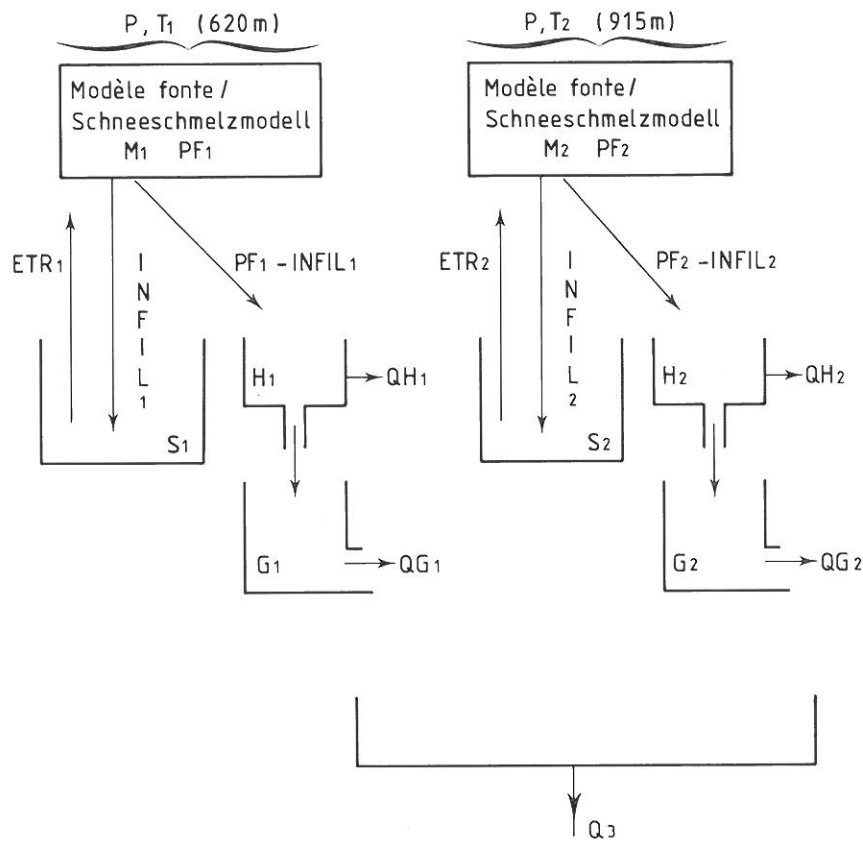


Fig. 5.2.2 Séparation du Modèle CREC (fonte de neige) en deux modules parallèles

Abb. 5.2.2 Trennung des CREC-Modells (Schneesmelze) in zwei parallele Modulen

Voici la définition des différentes variables utilisées:

Die benutzten Variablen:

- P : Pluie journalière à la station de Kruth
- T : Température moyenne journalière relevée aux deux postes de Sewen Lac d'Alfeld (T1) et Sewen Grand Langenberg (T2)
- M : Modèle de fonte de neige (M1, M2) déduit du modèle de fonte du «snow hydrology»

- P : Tagesniederschlag an der Station Kruth
- T : Mittlere Tagestemperatur gemessen an den beiden Stationen Sewen Lac d'Alfeld (T1) und Sewen Grand Langenberg (T2)
- M : Schneesmelzmodell (M1, M2) abgeleitet aus dem Schneesmelzmodell «snow hydrology»

- PF : L'eau disponible au sol est obtenue en ajoutant à la fonte, la pluie (station de Kruth) non retenue dans le stock de neige. Cette eau est introduite dans le réservoir S de CREC, sans qu'il soit nécessaire de savoir si elle provient de la pluie ou de la fonte de neige, ou des deux à la fois.

- PF : Das an der Oberfläche verfügbare Wasser wird erfaßt durch Summierung des Niederschlags (Station Kruth), welcher nicht in der Schneedecke zurückbleibt mit dem Schmelzwasser. Dieses Wasser wird in den Speicher S des CREC-Modells eingeführt. Dabei ist es nicht notwendig zu wissen, ob es sich um Niederschlag oder Schneesmelze oder um beide handelt.

- ETR : Evapotranspiration réelle
- INFIL : Infiltration
- S : Réservoir superficiel (ruissellement)
- H : Réservoir dit hypodermique
- G : Réservoir souterrain (nappe)
- QH : Écoulement du réservoir H
- QG : Écoulement du réservoir G
- QJ : Débits moyens journaliers

- ETR : Wirkliche Evatranspiration
- INFIL : Infiltration
- S : Oberflächenspeicher (Oberflächenabfluß)
- H : »Hypodermischer« Speicher
- G : Unterirdischer Speicher
- QH : Abfluß aus dem Speicher H
- QG : Afluß aus dem Speicher G
- QJ : Mittlere Tagesabflüsse

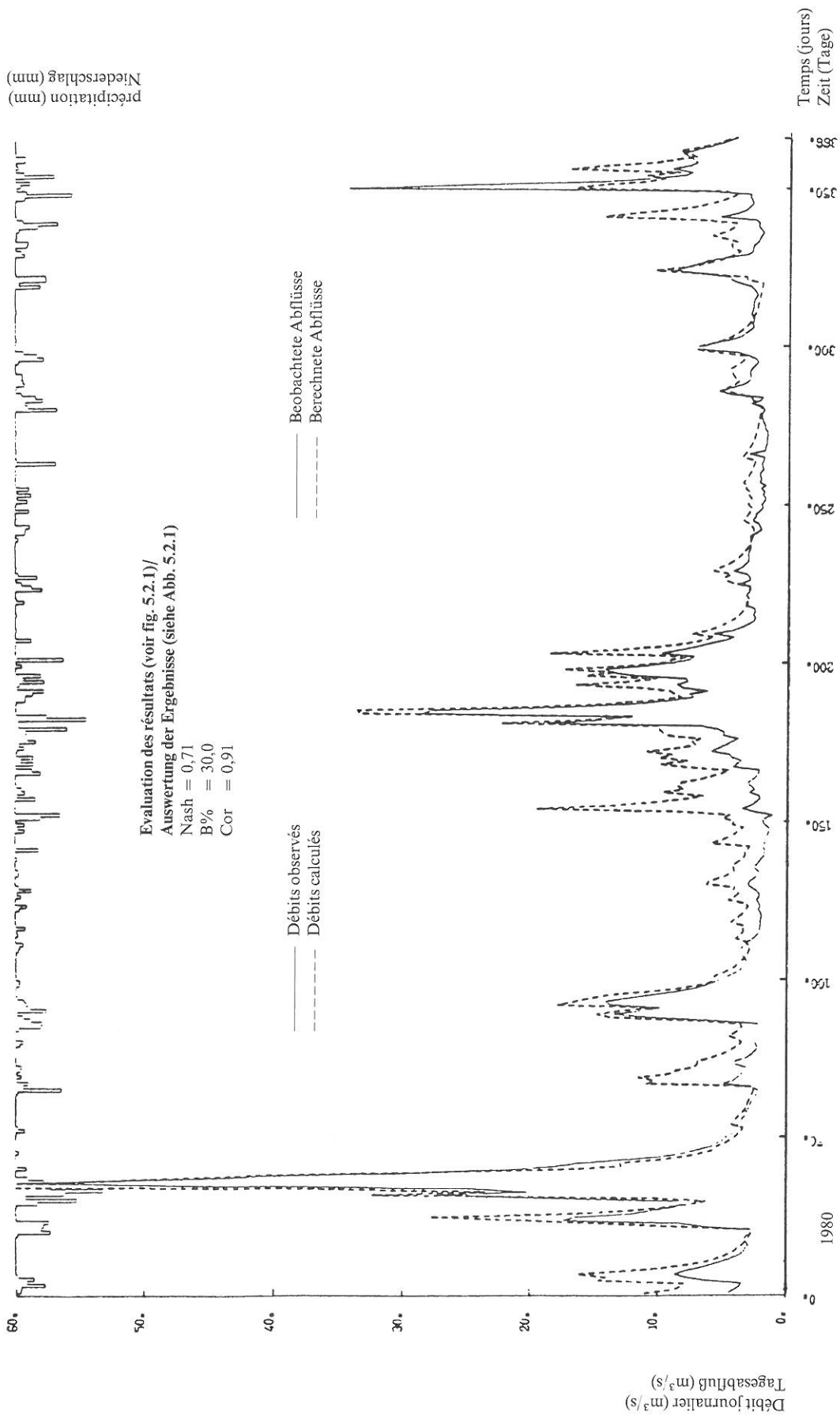


Fig. 5.2.3 Simulation sans prise en compte du régime nival

Abb. 5.2.3 Simulation ohne Berücksichtigung der Schneeschmelze

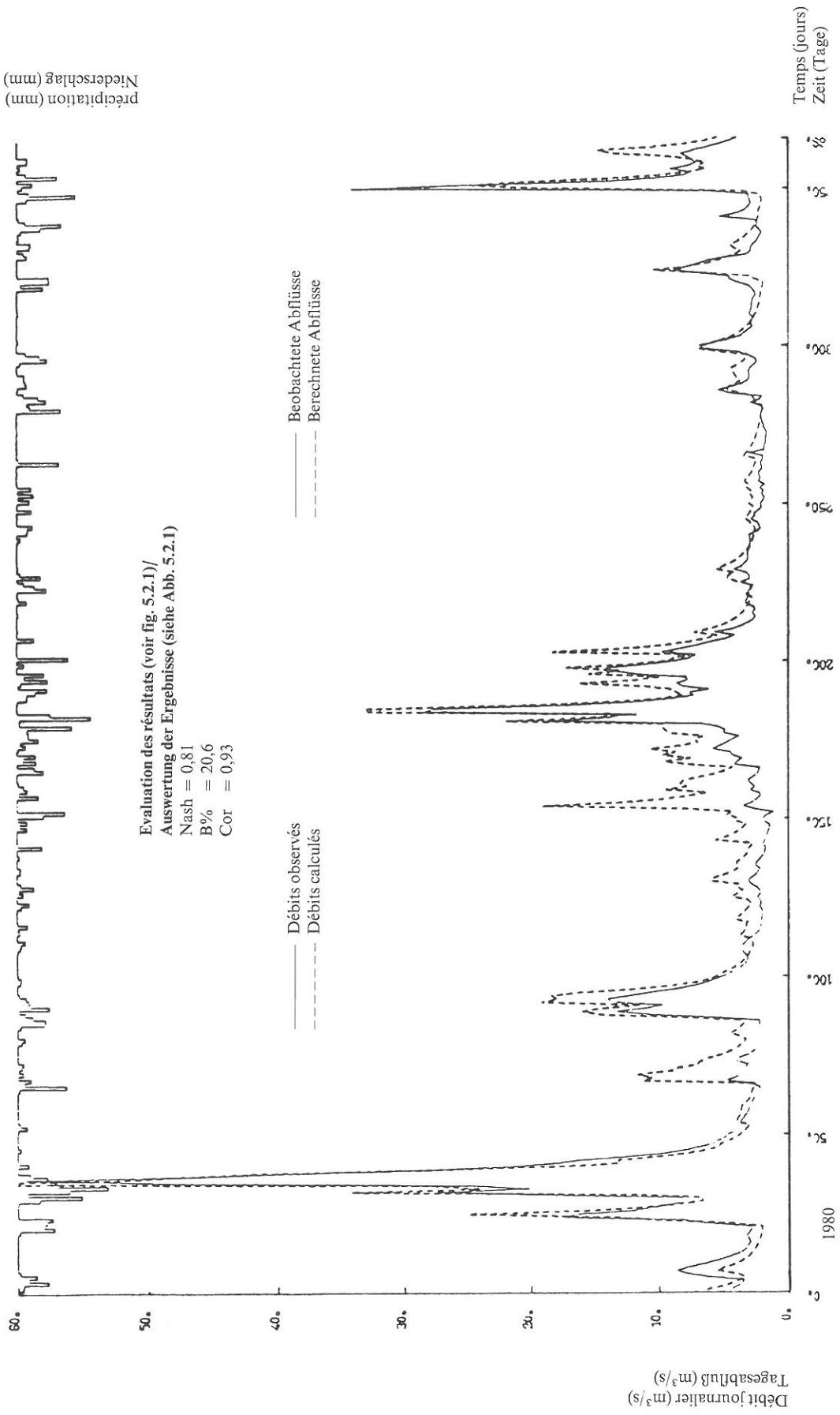


Fig. 5.2.4 Simulation avec prise en compte du régime nival; séparation en deux sous-modules régis par T1 et T2
 Abb. 5.2.4 Simulation mit Berücksichtigung der Schneeschmelze; Trennung in zwei Teilmodulen für T1 und T2

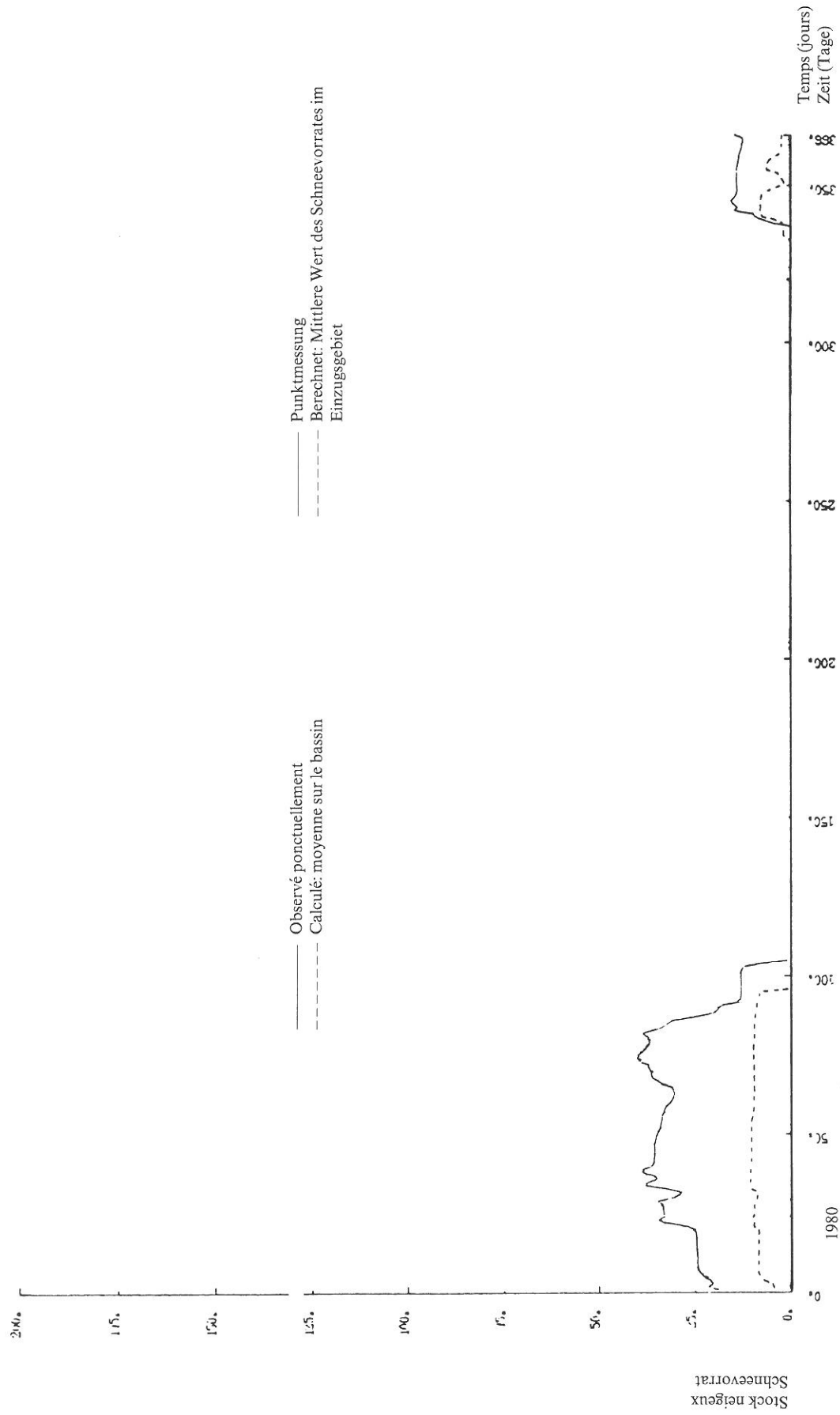


Fig. 5.2.5 Evolution du stock neigeux (équivalent en eau)

Abb. 5.2.5 Entwicklung des Schneevorrates (Wasseräquivalent)

L'analyse des chroniques des températures moyennes journalières aux stations thermométriques a souligné les difficultés que pouvait rencontrer la mise au point d'un modèle très fiable, propre à simuler la thermique du bassin. Les phénomènes d'inversion de températures, les conditions d'exposition, sont très difficiles à prendre en compte et l'usage de tels modèles est dépassé.

La prise en compte du régime nival améliore la simulation des débits journaliers de la Thur à Willer comme on peut le constater à partir des figures 5.2.3 et 5.2.4. La séparation en deux sous-modules améliore très significativement les simulations, soulignant ainsi la grande sensibilité des modèles de fonte aux faibles écarts thermiques.

Les écarts entre stock neigeux observé (méthode de la sonde à rayons τ) et calculé par le modèle (cf. fig. 5.2.5) sont assez élevés, ce qui s'explique par la différence entre une mesure ponctuelle à l'altitude de 1100 mètres et la valeur d'un stock moyen pour le bassin calculé à partir du stock relatif à chaque sous-module. La représentativité comparable des deux stations T1 et T2 nous a fait adopter un poids égal pour la contribution de chacun des deux modules. Dans l'ensemble, les variations de stock neigeux sont assez bien reproduites; c'est d'ailleurs ce qui importe étant donné l'utilisation que l'on souhaite faire de ce modèle partiel: emprunter sa fonction de production (pluie nette – fonte) pour la prévision des crues de l'Ill à Colmar.

5.2.4. La prévision des débits de l'Ill à Colmar à 18 heures

L'objectif, ici prioritaire qu'est la prévision des débits avec délai imposé, a contraint à travailler avec un pas de temps compatible avec ces exigences : le pas de temps de 2 heures a été adopté.

Le modèle comportant, comme seuls prévisseurs les débits aux stations amont (Ensisheim, Willer, Reiningue, Altkirch, Guebwiller) donnant lieu à des prévisions de qualité peu satisfaisante, il a été tenté de faire intervenir la pluie comme facteur explicatif supplémentaire.

La méthode des moindres carrés récursifs, pour des raisons liées à la facilité d'utilisation, a été préférée à la méthode du filtre de Kalman pour laquelle, au delà de 3 prévisseurs, il devient assez fastidieux de caler les paramètres du filtre ($Q(n,n)$, R_k). Le problème du mélange de pas de temps différents (on ne dispose que de valeurs journalières en ce qui concerne les pluies) sem-

Die Analyse der langjährigen mittleren Tagestemperaturen an allen Stationen hat deutlich gemacht, daß die Entwicklung eines zuverlässigen Modelles zur Simulation der thermischen Verhältnisse des Einzugsgebietes sehr schwierig ist. So können solche Modelle z.B. Phänomene wie Temperaturinversion und Exposition nicht hinreichend abbilden.

Wie die Abbildungen 5.2.3 und 5.2.4 zeigen, hat die Berücksichtigung der Schneeschmelze eine Verbesserung der Simulation der Tagesabflüsse der Thur am Pegel Willer herbeigeführt. Die o.g. Trennung in zwei Teilmodulen verbessert das Rechenergebnis erheblich, wodurch die große Empfindlichkeit der Schneeschmelzmodelle auf geringfügige Temperaturänderungen unterstrichen wird.

Die Unterschiede zwischen den beobachteten (Gammasondenmethode mit Strahlung) und den von dem Modell berechneten Schneemengen sind ziemlich groß (siehe Abbildung 5.2.5). Dies läßt sich durch den Unterschied zwischen einem Punktmeßwert auf 1100 m Höhe und dem mittleren Wert des Schneevorrates im Einzugsgebiet, berechnet aus dem relativen Vorrat jedes Teilmodules, erklären. Weil die Stationen T1 und T2 gleich repräsentativ sind, wird jedem der Module auch ein gleiches Gewicht zugeordnet. Im großen und ganzen werden die Unterschiede in den Schneevorräten ziemlich gut wiedergegeben; wenn man den angestrebten Verwendungszweck des Modelles betrachtet, ist das übrigens gerade der wichtigste Punkt, nämlich die Benutzung einer Übertragungsfunktion (Netto-Niederschlag – Schneeschmelze) für die Hochwasservorhersage der Ill am Pegel Colmar.

5.2.4. Die Abflußvorhersage für die Ill am Pegel Colmar mit einer Vorhersagefrist von 18 Stunden

Das hier wichtigste Ziel, die Abflußvorhersage mit festgelegter Vorhersagefrist, hat dazu geführt, einen Zeitschritt von 2 Stunden anzunehmen.

Das Modell enthält als einzige Eingabedaten die Abflüsse der Oberstrompegel Ensisheim, Willer, Reiningue, Altkirch und Guebwiller. Da die Qualität der Vorhersagen anhand dieser Eingabedaten nicht sehr befriedigend war, hat man versucht, zusätzlich Niederschlagsdaten einzuführen.

Wegen ihrer einfachen Handhabung wird die Methode der rekursiven kleinsten Quadrate angewandt. Diese wird der Kalman-Filtermethode vorgezogen, da letztere bei mehr als 3 Eingabedaten bei der Bestimmung der Filterparameter ($Q(n,n)$, R_k) große Schwierigkeiten bereitet. Das Problem der Vermischung der verschiedenen Zeitschritte (man verfügt nur über Ta-

ble en partie résolu par le choix d'une méthode adaptative pour remettre à jour les paramètres du modèle:

$$C(+9) = X1A(0) + X2W(0) + X3R(0) + X4G(0) + X5PE + X6$$

- C(+9): Prévission à 18 heures à Colmar; le modèle de prévision fonctionnant au pas de temps de 2 heures (9 x 2 = 18)
 X1 ... X6: Paramètre de la régression multiple
 PE: Pluie nette et fonte (fonction de production modèle pluie-neige-débit)
 A(0): débit instantané à la station hydrométrique d'Altkirch au moment (t0) ou on émet la prévision (t0=0)
 W(0): débit instantané à la station hydrométrique de Willer
 R(0): débit instantané à la station hydrométrique de Guebwiller

Cela étant, pouvoir disposer de pluies sur des intervalles de temps plus courts devrait très certainement améliorer la qualité des prévisions. Dans le logiciel élaboré, une option permet la prise en compte de données de pluies (télétransmises) sur des pas de temps plus courts, sans que l'on ait pour cela à changer la structure du modèle. On peut espérer que le filtrage du signal pluie nette par un réservoir quadratique donnera des résultats plus probants que ceux obtenus à partir de la pluie nette journalière. On rappelle que la réponse donnée par un tel réservoir est:

$$U = \frac{H^2}{H + X}$$

où U = sortie (écoulement) et H = le niveau du réservoir en mm (initialisé avec le débit initial de la rivière) et X = un paramètre permettant d'intensifier, ou au contraire de réduire, le rôle de filtre joué par ce bassin fictif. Celui-ci permet d'éviter les changements brusques à chaque pas de temps de la pluie nette (dans le cas de la pluie nette journalière on peut passer, par exemple, de 0 à 90 mm) en lissant, sans trop réduire le caractère impulsif de la pluie. Cela permet, du fait de l'utilisation d'une méthode adaptative de remise à jour des paramètres du modèle, d'éviter des valeurs aberrantes lors de la phase prévision dues à une correction anormalement forte pour compenser la faiblesse ou la nullité soudaine du prévisseur pluie.

5.2.5. Résultats du modèle

Les résultats du modèle actuel font l'objet de trois rapports du C.E.M.A.G.R.E.F. de novembre 1984,

gesniederschlagssummen) scheint zum Teil durch die Wahl der zeitlichen Anpassung der Modellparameter gelöst:

- C(+9): Abflußvorhersage (18 h) am Pegel Colmar
 X1 ... X6: Parameter der Mehrfachregression
 PE: Netto-Niederschlag + Schneeschmelze
 A(0): Momentanabfluß an der hydrometrischen Station Altkirch im Moment (t=0), wenn man die Vorhersage ausgibt (t0=0)
 W(0): Momentanabfluß an der hydrometrischen Station Willer
 R(0): Momentanabfluß an der hydrometrischen Station Guebwiller

Niederschlagsdaten kürzerer Zeitintervalle würden die Qualität der Vorhersage erheblich verbessern. In der entwickelten Software ermöglicht eine Option die Eingabe von Niederschlagsdaten (telefonische Fernübertragung) für kleinere Zeitspannen, ohne dabei die Struktur des Modelles verändern zu müssen. Man darf erwarten, daß die Filterung des eingegebenen wirklichen Netto-Niederschlags durch die Schematisierung des Einzugsgebietes in Form eines quadratischen Beckens deutlich bessere Ergebnisse gibt als die Eingabe von Tagessummen des Netto-Niederschlags. Es ist bekannt, daß der Abfluß aus so einem Becken:

$$U = \frac{H^2}{H + X}$$

ist, wobei U = Ausfluß, H = Wasserstand im Becken in mm (Startwert wird vom Anfangswert des Zuflusses abgeleitet) und X = ein Parameter, der es erlaubt den Filtereinfluß des fiktiven Einzugsgebietes entweder zu verstärken oder zu reduzieren. Dieser Parameter besitzt eine ausgleichende Charakteristik und bewirkt eine Dämpfung von plötzlichen Veränderungen des Netto-Niederschlags während jedes Zeitschritts (die Tagessumme des Netto-Niederschlags kann z.B. von 0 bis 90 mm variieren), ohne dadurch die hohe Variabilität des Niederschlags allzusehr zu reduzieren. Diese Methode erlaubt also Vorhersagewerte anzupassen und solche abweichende Werte während der Vorhersageerstellung zu vermeiden, die durch eine starke Korrektur beim Ausgleich eines geringen oder plötzlich abbrechenden Niederschlags entstehen.

5.2.5. Ergebnisse des Modells

Die Ergebnisse des heutigen Modells sind Gegenstand dreier Berichte der C.E.M.A.G.R.E.F. vom

septembre 1985 et octobre 1985. Il ressort actuellement les principaux points suivants:

- la réactualisation du modèle »débits-débits« existant, en tenant compte des crues de 1983, a effectivement permis une amélioration de la prévision des débits au niveau de Colmar, mais uniquement pour les délais les plus courts : 6 et 12 h.
- pour les délais plus longs – 18 et 24 h – (et uniquement pour ces délais) l'introduction d'un prévisseur supplémentaire : la pluie ¹, améliore sensiblement la prévision à Colmar, comme le montrent les figures 5.2.7 et 5.2.8.
- les niveaux d'eau peuvent être prévus dans le champ d'inondations de l'Ill en aval immédiat de Colmar (échelle de crues d'Illhaeusern) et en aval de Selestat (échelle de crues de Kogenheim); compte tenu toutefois de la complexité des interférences mises en jeu dans ce vaste champ d'inondations, cette prévision ne peut avoir qu'un caractère essentiellement indicatif (l'erreur pouvant atteindre près de 20 cm pour les plus fortes crues).
- une amélioration de la prévision à 18 et 24 h par le modèle »pluie-neige-débits« semble être envisageable ultérieurement, en prenant en compte la pluie sur des pas de temps inférieurs à 24 h (18h, ..., 6h, ...), ce que permettra la modernisation actuelle des stations d'observations, alors que jusqu'à présent seules les pluies journalières sont disponibles en fichiers de dépouillement.

Un exemple de résultat de la prévision à 18 heures est présenté à la figure 5.2.6. Dans l'ensemble les prévisions sont acceptables eu égard aux exigences à satisfaire pour un bassin de taille somme toute assez modeste. La prise en compte des pluies au pas de temps 2 heures devrait améliorer significativement la qualité des prévisions.

¹ A noter qu'il s'agit en fait de »pluie nette«*, calculée par le modèle à partir de la pluviométrie du poste Kruth sur le bassin de la Thur (reconnu actuellement par le C.E.M.A.G.R.E.F. comme le poste le plus représentatif du Massif Vosgien pour la prévision des débits à Colmar) et de l'évolution du manteau neigeux sur les Vosges (observé à 1100 m d'altitude au Thannerhübel) en fonction des températures de l'air (disponibles en particulier aux stations de Sewen)

* »pluie nette = pluie efficace«: fraction de la pluie qui contribue réellement à l'alimentation des cours d'eau par écoulement directement relié à la pluie (volume de pluie nette = volume écoulé directement)

November 1984, September 1985 und Oktober 1985. Daraus geht hervor:

- die Neubearbeitung des vorhandenen Modelles (»Abfluß-Abfluß«), durchgeführt anlässlich der Hochwasser von 1983, hat zu einer wesentlichen Verbesserung der Abflußvorhersage am Pegel Colmar geführt; dies aber nur für die kurzen Vorhersagefristen von 6 und 12 Stunden.
- ausschließlich für die längeren Fristen von 18 und 24 Stunden führt die Einbeziehung der zusätzlichen Größe »Niederschlag«¹, zu einer deutlichen Verbesserung der Vorhersage am Pegel Colmar (siehe Abbildungen 5.2.7 und 5.2.8).
- die Wasserstände können für das Vorland unmittelbar unterhalb von Colmar (Hochwasserpegel Illhäusern) und unterhalb von Selestat (Hochwasserpegel Kogenheim) vorhergesagt werden. Wenn man jedoch der vielfachen Überlagerungsmöglichkeiten in diesem weiten Vorland Rechnung tragen will, kann diese Vorhersage nur einen hinweisenden Charakter haben (hierbei kann der Fehler ca. 20 cm für die höchsten Hochwasser betragen).
- eine Verbesserung der Vorhersage für längere Fristen (18 und 24 Std.) mit dem Modell »Regen-Schnee-Abflüsse« scheint durch Einbeziehung von Niederschlagsdaten in den Zeitschritten kleiner als 24 Std. (18 Std., ..., 6 Std., ...) möglich, was durch die heutige Modernisierung der Beobachtungsstationen ermöglicht wird. Z.Z. stehen nur die Tagessummen der ausgewerteten Niederschläge in Dateien zur Verfügung.

Abbildung 5.2.6 zeigt als Beispiel eine Vorhersage mit einem Zeitraum von 18 Std. Angesichts der geringen Größe des Einzugsgebietes können die Ergebnisse im großen und ganzen als brauchbar gelten. Wenn man für die Zeitschritte von 2 Stunden Niederschlagswerte in Rechnung bringt, würde das die Qualität der Vorhersagen erheblich verbessern.

¹ Es sei bemerkt, daß es sich um »netto Niederschlag«* handelt. Das Modell berechnet diesen Wert aus Niederschlagsmessungen der Station Kruth im Einzugsgebiet der Thur (z.Z. von der C.E.M.A.-G.R.E.F. als die repräsentativste Station des Vogesenmassives für die Abflußvorhersage am Pegel Colmar betrachtet) und aus der Entwicklung der Schneedecke in den Vogesen. Diese wird in 1100 m Höhe auf der Thannerhübel beobachtet und ist abhängig von den Lufttemperaturen (insbesondere an den SEWEN-Stationen).

* »netto Niederschlag = wirksamer Niederschlag«: Teil des Niederschlags welcher tatsächlich zum Abfluß beiträgt. (Volumen des wirksamen Niederschlags = Volumen das sofort abfließt).

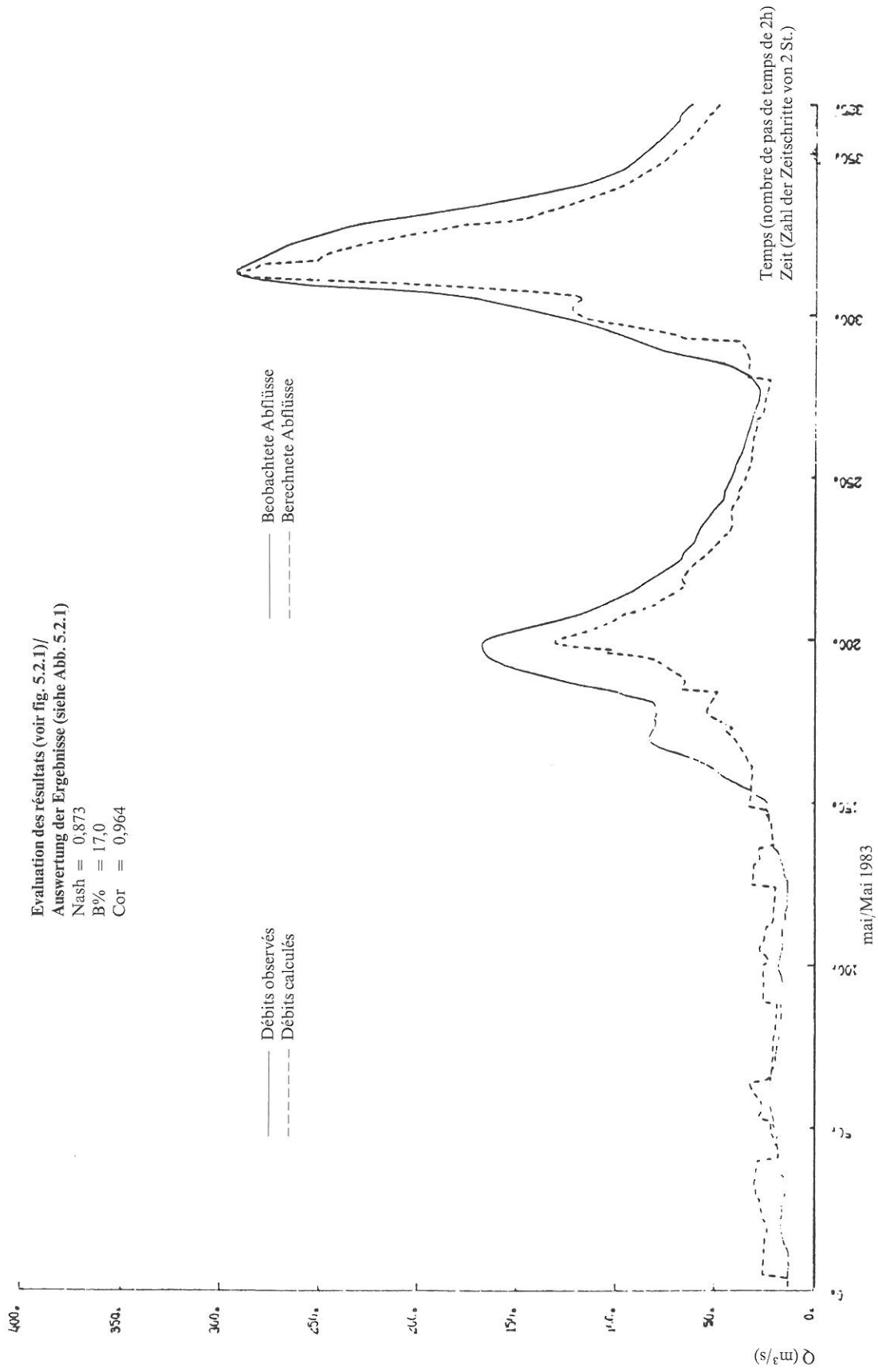


Fig. 5.2.6 Prédiction à Colmar (délai 18 heures)

Abb. 5.2.6 Vorhersage am Pegel Colmar (Frist von 18 Stunden)



Fig. 5.2.7 L'III à Colmar-Ladhof (crue de mai 1983)
Prévision à 18 heures sans la »Pluie«.

Abb. 5.2.7 Die III am Pegel Colmar-Ladhof (Hochwasser Mai 1983)
Vorhersage für 18 Stunden ohne »Niederschlag«

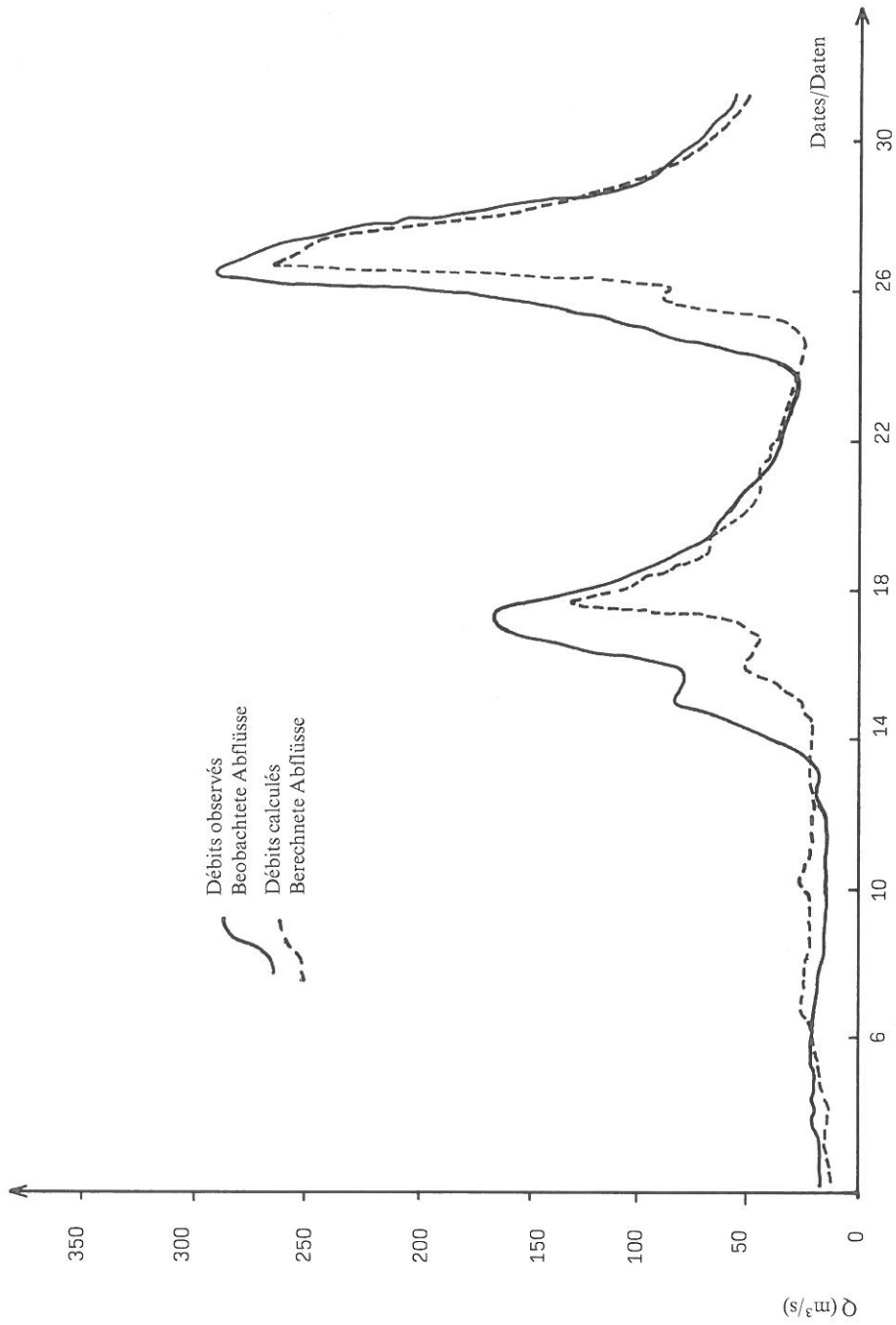


Fig. 5.2.8 L'III à Colmar-Ladhof (crue de mai 1983)
Prévision à 18 heures avec la «Pluie»

Abb. 5.2.8 Die Ill am Pegel Colmar-Ladhof (Hochwasser Mai 1983)
Vorhersage für 18 Stunden mit »Niederschlag«

5.2.6. Conclusion

Pour des délais de prévision relativement courts ou proches du pas de temps utilisé, l'usage de méthodes adaptatives peut en quelque sorte nous dispenser de l'utilisation d'un module de fonte pour tenter d'améliorer significativement la prévision des débits dans le cas où le régime nival n'est que faiblement prononcé. Il peut en être certes tout autrement lorsque le délai de prévision devient important vis-à-vis du pas de temps utilisé. En effet, sur une échéance de l'ordre de la journée, il n'est pas rare que se produisent des effets de foehn susceptibles d'accélérer considérablement la fonte, surtout lorsque celle-ci est alimentée par des pluies abondantes, ou que l'on assiste au contraire à une transformation pluie neige par l'avancée d'un front froid. Aussi apparaît-il prudent d'essayer de prendre en compte ces phénomènes bien qu'exceptionnels au moyen d'un modèle, si »grossier« soit-il.

5.2.6. Schlußfolgerung

Für eine Kurzfristvorhersage die nur geringfügig vom benutzten Zeitschritt abweicht, kann die Anpassungsmethode angewandt und darf das Schneeschmelzmodul nahezu außer Betracht gelassen werden. Wenn der Einfluß der Schneeschmelze nur gering ist, kann man auf diese Weise die Abflußvorhersage erheblich verbessern, anders jedoch, wenn die Vorhersagefrist den Zeitschritt deutlich übersteigt. So ist es keine Seltenheit, wenn sich innerhalb eines Tages durch Föhn-Einfluß die Schneeschmelze beschleunigt, vor allem wenn diese noch von ausgiebigen Niederschlägen bespeist wird. Umgekehrt kann durch die Annäherung einer Kaltfront eine Transformation von Regen in Schnee entstehen. Der Versuch hat sich daher auch als vernünftig herausgestellt, dieses außergewöhnliche Phänomen mittels eines Modelles, sei es noch so grob, zu erfassen.

5.3 MOSELLE

5.3.1 Etudes antérieures

Dans les années soixante-dix, le Service de la Navigation de Nancy, en tant qu'autorité chargée de la prévision des débits dans le bassin de la Moselle, a élaboré un modèle mathématique pour la prévision des crues à court terme et pour la prévision des étiages. Ce modèle avait comme caractéristiques:

- l'utilisation de la régression multiple linéaire débit-débit
- la prise en compte possible également de la pluie et du régime nival
- la subdivision en deux sections: haute-Moselle et basse-Moselle (crue).

La vérification de ce modèle lors de la crue du printemps de 1983 a produit des résultats peu satisfaisants, pour la raison évidente que le modèle avait été ajusté précédemment à partir d'ondes de crue beaucoup moins hautes, dans les années soixante-dix et que les données transmises de précipitation et de neige étaient peu fiables.

Par la suite, le modèle ne fut pas mis en service.

5.3.2 Etudes nouvelles

Entre-temps l'élaboration d'un ensemble de modèles riche en variantes a été entreprise par le Laboratoire d'Hydrologie Mathématique à Montpellier. Cette étude devrait s'achever au courant de 1989.

Afin de garantir l'utilisation opérationnelle du modèle ainsi qu'une grande exactitude des calculs, il est envisagé d'y incorporer diverses options:

- l'utilisation exclusive de relations entre stations de mesure qui ont été vérifiées statistiquement
- si nécessaire l'incorporation de filtres
- la préparation de procédures simplifiées pour les cas d'indisponibilité de certaines données
- la préparation de procédures distinctes également pour les différents domaines des hauteurs d'eau
- une structure modulaire du modèle pour la relation pluie-débit, l'écoulement de l'onde, le bassin versant intermédiaire et pour la fonte de la neige.

Une prévision aussi exacte que possible est envisagée pour les stations du bassin suivantes:

ÉPINAL: 4 heures, si possible 8

5.3 MOSEL

5.3.1 Zurückliegende Arbeiten

In den 70er Jahren hat der Service de la Navigation de Nancy als für die Abflußvorhersage im Moselgebiet zuständige Dienststelle ein mathematisches Modell für die kurzfristige Hochwasservorhersage und für die Niedrigwasservorhersage entwickelt. Kennzeichnend für dieses Modell war:

- Anwendung der linearen Mehrfachregression Abfluß-Abfluß
- wechselweise Einbeziehung auch von Regen und Schneeschmelzraten
- Aufteilung in die Teilgebiete obere und untere Mosel (Hochwasser).

Die Erprobung dieses Modells beim Frühjahrs-Hochwasser 1983 brachte unbefriedigende Ergebnisse, offenbar weil die vorausgehende Eichung an erheblich geringeren Hochwasserwellen der 70er Jahre vorgenommen wurde und weil die Zuverlässigkeit der übermittelten Regen- und Schneedaten zu wünschen übrig ließ.

Das Modell kam weiterhin nicht zum Einsatz.

5.3.2 Neue Modellarbeiten

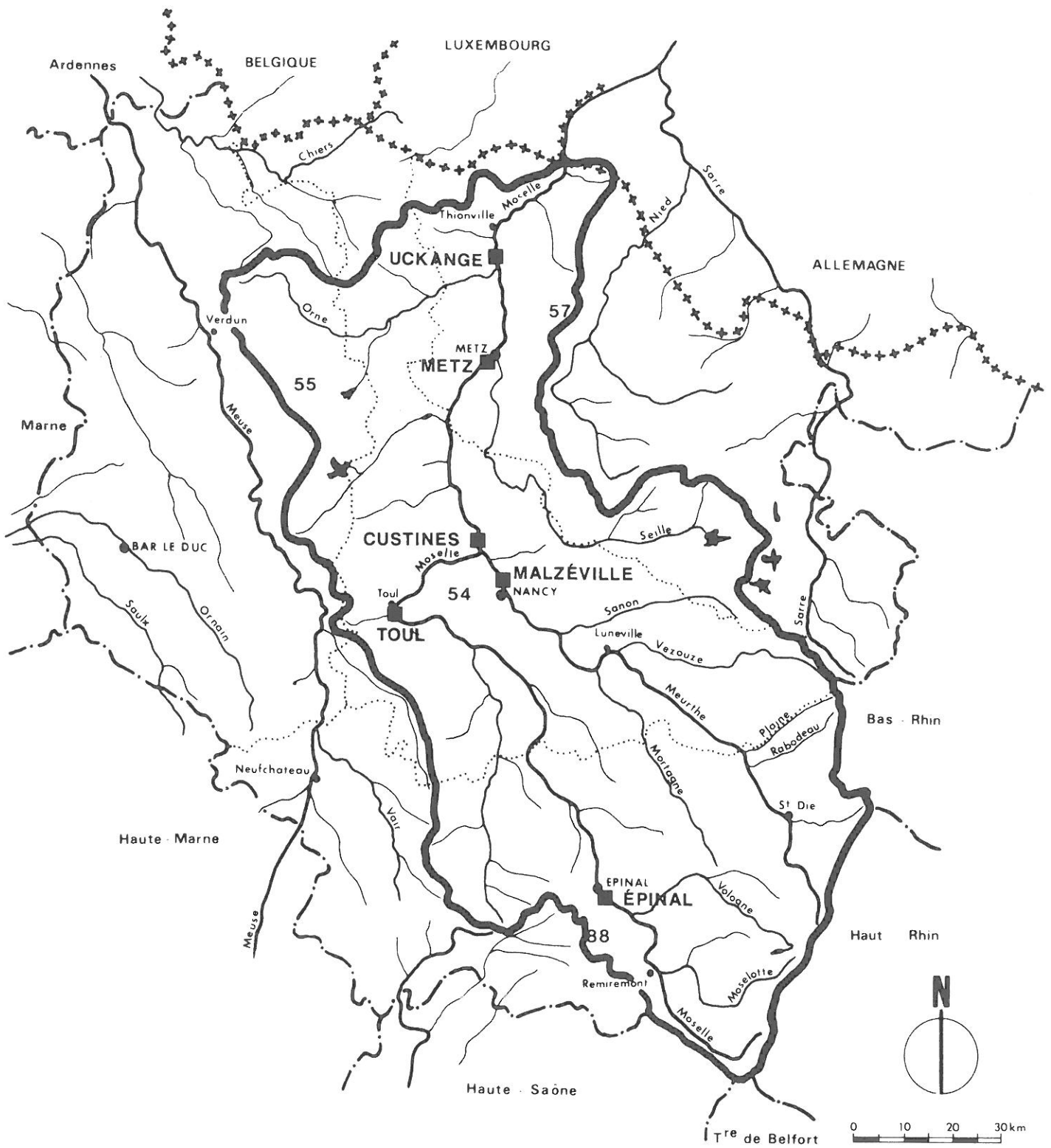
Inzwischen wurde am Laboratoire d'Hydrologie Mathématique in Montpellier mit der Erstellung einer variantenreichen Modellpalette begonnen. Die Untersuchung soll bis zum Jahr 1989 abgeschlossen sein.

Um den operationellen Modellbetrieb und eine hohe Rechengenauigkeit zu gewährleisten, sind diverse Optionen vorgesehen:

- Verwendung ausschließlich statistisch bestätigter Pegelbeziehungen
- nötigenfalls Einbeziehung von Filtern
- Bereitstellung von einfacheren Modellbausteinen für den Fall von Datenausfall
- Bereitstellung verschiedener Modellbausteine auch für unterschiedliche Wasserstandsbereiche
- modulare Modellstruktur für Niederschlag-Abfluß, Wellenablauf, Zwischeneinzugsgebiet und Schneeschmelze.

Die Vorhersage soll für folgende Pegel des Einzugsgebietes mit möglichst großer Vorhersagegenauigkeit erstellt werden:

ÉPINAL: 4 Stunden, wenn möglich 8 Stunden



■ Stations où seront faites les prévisions
 ■ Vorhersagepegel

Fig. 5.3.1 Points de prévision pour les modèles de prévision des crues dans le bassin de la Moselle française

Abb. 5.3.1 Vorhersagepegel für die Hochwasservorhersagemodelle im Einzugsgebiet der französischen Mosel

MALZÉVILLE: 8 heures et si possible 24, à défaut 12

TOUL: *idem*

CUSTINES: *idem*

METZ: 8 heures et si possible 48, à défaut 12

UCKANGE: 8 heures et 24 heures

Un appel d'offres auprès plusieurs bureaux d'étude est prévu pour 1988.

Un autre modèle de prévision pour la Moselle est décrit au chapitre 5.5.4. Il s'agit d'un modèle à canaux multiples de filtrage pour les stations allemandes de la Moselle, à Trèves et à Cochem, qui est actuellement mis au point en République fédérale d'Allemagne.

MALZÉVILLE: 8 Stunden und wenn möglich 24 Stunden, sonst 12 Stunden

idem

idem

METZ: 8 Stunden und wenn möglich 48 Stunden, sonst 12 Stunden

UCKANGE: 8 und 24 Stunden

Die Angebotsausschreibung an verschiedene Ingenieurbüros ist noch für 1988 vorgesehen.

Paragraph 5.5.4 enthält die Beschreibung eines anderen Vorhersagemodells für die Mosel, ein Mehrkanalfilter-Modell für die deutschen Pegel Trier und Cochem, das zur Zeit in der Bundesrepublik Deutschland erstellt wird.

5.4 SARRE

5.4.1 Modèle de prévision des débits de crue sur la Sarre

Le Service de la Navigation de Strasbourg est chargé de l'annonce des crues sur la Sarre, dans sa partie française. En vue de perfectionner et de moderniser la nature des renseignements fournis au public en période de crues, un système de prévision des débits en hautes eaux sur quatre stations hydrométriques de la Sarre a été établi.

Une étude sur modèle mathématique a été faite par le Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou en 1973. A partir de cette étude, des simulations de prévisions ont été faites pour les différentes crues de la Sarre depuis 1978 (crue de 1979, 1980, 1981 et 1983). Il a été constaté des écarts assez importants entre les hauteurs prévues et les hauteurs observées. Une nouvelle étude a donc été menée pour réajuster les prévisions sur le bassin aval aux stations de Keskastel, Sarralbe, Wittring et Sarreinsming à partir des crues d'octobre 1981, avril 1983 et mai 1983.

Un autre modèle de prévision pour la Sarre est décrit au chapitre 5.5.4. Il s'agit d'un modèle à canaux multiples de filtrage pour la station allemande de la Sarre, à Sarrebruck, qui est actuellement mis au point en République fédérale d'Allemagne.

5.4.1.1 Principes généraux

Ce modèle mathématique français tel qu'il a été élaboré permet, à partir d'informations d'entrée bihoraires concernant la pluie et les débits, de prévoir en un certain nombre de stations (cf. tableau 5.4.1 et figure 5.4.1) la valeur du débit avec 6, 8, 12 ou 14 heures d'avance.

C'est un modèle stochastique (et non de propagation) faisant intervenir pour une station donnée des régressions multiples et linéaires sur les débits et les pluviométries des stations amont.

5.4 SAAR

5.4.1 Modell zur Vorhersage der Hochwasserabflüsse an der Saar

Die Hochwassermeldung für den französischen Streckenabschnitt der Saar obliegt dem Service de la Navigation de Strasbourg. Um die bei Hochwasser an die Öffentlichkeit gegebenen Meldungen zu verbessern und zu aktualisieren, wurde ein Hochwasserabflußvorhersagesystem auf der Grundlage von vier Pegelstationen der Saar eingerichtet.

Im Jahre 1973 wurde von dem Laboratoire National d'Hydraulique (Staatl. Wasserbaulaboratorium) in Chatou ein mathematisches Modell ausgearbeitet. Ausgehend von dieser Studie wurden Vorhersagesimulationen für verschiedene Hochwässer der Saar seit 1978 gemacht (Hochwasser von 1979, 1980, 1981 und 1983). Es wurden erhebliche Unterschiede zwischen vorhergesagten und gemessenen Wasserständen festgestellt. Deshalb wurde eine neue Studie angestellt mit dem Ziel, die Vorhersagen in dem Gebiet unterhalb der Pegel Keskastel, Sarralbe, Wittringen und Sarreinsming nachzueichen, ausgehend von den Hochwässern vom Oktober 1981, April 1983 und Mai 1983.

Paragraph 5.5.4 enthält die Beschreibung eines anderen Vorhersagemodells für die Saar, ein Mehrkanalfilter-Modell für den deutschen Pegel Saarbrücken, das zur Zeit in der Bundesrepublik Deutschland erstellt wird.

5.4.1.1 Allgemeine Grundlagen

Mit diesem so ausgearbeiteten französischen Modell kann, ausgehend von zweistündlich eingegebenen Eingangsdaten über Niederschläge und Abflüsse, an einer bestimmten Anzahl von Stationen (s. Tabelle 5.4.1 und Abbildung 5.4.1) der Abflußwert für 6, 8, 12 oder 14 Stunden vorhergesagt werden.

Es handelt sich um ein stochastisches Modell (und kein Laufzeitmodell), das für eine gegebene Meßstation durch Mehrfach- und Linearregression auf die Abfluß und Niederschlagsmessungen der stromaufwärts gelegenen Stationen diese Werte in die Berechnung einführt.

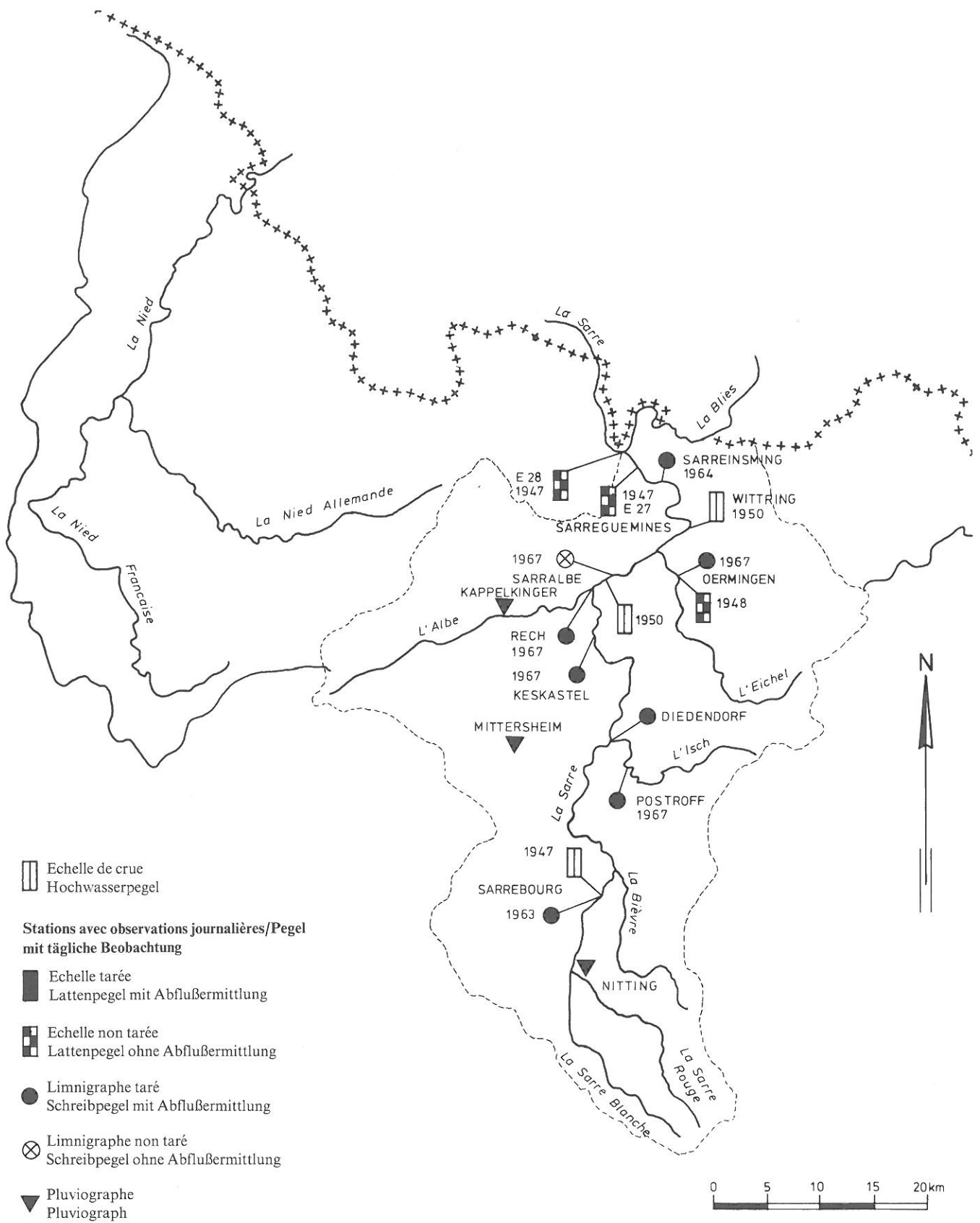


Fig. 5.4.1 Réseau d'annonce et de prévision des crues de la Sarre

Abb. 5.4.1 Hochwasservorhersage- und Meldungsnetz für die Saar

	Prévision à 6 heures/ Vorhersage für 6 Stunden			Prévision à 12 heures/ Vorhersage für 12 Stunden		
	Possibilité/ Möglichkeit	Information pluie Niederschlags- daten	Information débit Abflußdaten	Possibilité Möglichkeit	Information pluie Niederschlags- daten	Information débit Abflußdaten
SARREBOURG	oui/ja	NITTING	--	non/nein	--	--
DIEDENDORF	oui/ja	MITTERSHEIM	SARREBOURG POSTROFF	incertaines/ unsicher	MITTERSHEIM	--
KESKASTEL	oui/ja	MITTERSHEIM	SARREBOURG POSTROFF	oui/ja	MITTERSHEIM	SARREBOURG
SARRE ALBE	oui/ja (8 heures/ 8 Stunden)	KAPPELKINGER	KESKASTEL* POSTROFF SARREBOURG	oui/ja (14 heures/ 14 Stunden)	KAPPELKINGER	KESKASTEL* POSTROFF SARREBOURG
WITTRING	oui/ja	--	RECH KESKASTEL OERMINGEN	oui/ja	KAPPELKINGER	RECH KESKASTEL OERMINGEN
SARREINSMING	oui/ja	--	KESKASTEL RECH OERMINGEN	oui/ja	KAPPELKINGER	KESKASTEL RECH OERMINGEN

Remarque: Les informations débit aux 6 stations où sont effectuées les prévisions, sont nécessaires puisque le système est auto-régressif.

* Information débit »prévu« à Keskastel à 6 heures et 12 heures.

Tableau 5.4.1 Stations de mesure nécessaires au système de prévision

Bemerkung: Die Abflußdaten an den 6 Vorhersagestationen sind erforderlich, weil das System autoregressiv ist.

* »Vorhergesagter« Abfluß bei Keskastel für 6 und 12 Stunden.

Tabelle 5.4.1 Meßstationen für das Vorhersagesystem

5.4.1.2 Résultats mathématiques

Suivant le principe exposé ci-dessus, on obtient donc pour chacune des stations de prévision (Keskastel, Sarralbe, Wittring et Sarreinsming) une formule linéaire donnant le débit prévu à l'instant $j + \Delta t$, $Q_{j+\Delta t}$, (Δt étant la durée de prévision à 6, 8, 12 ou 14 heures) en fonction des informations de débit et de pluie aux stations amont aux instants j , $j-2h$, $j-4h$, etc. ainsi que généralement en fonction du débit de cette même station à l'instant j (modèle autorégressif). Les différentes formules sont consignées dans le tableau 5.4.2.

La saisie des informations étant bihoraire (débits instantanés et pluviométries bihoraires), les prévisions sont également bihoraires.

5.4.1.3 Fonctionnement

Les stations hydrométriques indiquant les hauteurs pour les prévisions sont équipées d'un transmetteur parlant sur réseau téléphonique (P.T.T.). Toutes les informations sont centralisées à la Subdivision du

5.4.1.2 Mathematische Ergebnisse

Nach dem vorstehend erläuterten Prinzip erhält man also für jede Vorhersagestation (Keskastel, Sarralbe, Wittringen und Sarreinsming) eine lineare Formel, die den vorhergesagten Abfluß $Q_{j+\Delta t}$ zum Zeitpunkt $j + \Delta t$, als Funktion der Abfluß- und Niederschlagsdaten der stromaufwärts gelegenen Meßstationen zu den Zeitpunkten j , $j-2h$, $j-4h$ usw. sowie allgemein als Funktion des Abflusses dieser selben Station zum Zeitpunkt j (autoregressives Modell) angibt; Δt stellt dabei die Vorhersagezeit (6, 8, 12 oder 14 Stunden) dar. Die verschiedenen Formeln sind in der Tabelle 5.4.2 zusammengefaßt.

Da die Datenerfassung alle zwei Stunden erfolgt (Momentanwerte der Abflüsse und zweistündliche Niederschlagssummen), erfolgen die Vorhersagen ebenfalls zweistündlich.

5.4.1.3 Betrieb

Die Pegelstationen, welche die für die Vorhersagen benötigten Wasserstände registrieren, sind mit einer Sprechübertragung im Telephonnetz (P.T.T.) ausgestattet. Alle Daten werden bei der Subdivision du Ser-

Station	Prévision à Vorhersage für	Information débit à Abflußdaten an	Information pluie à Niederschlagsdaten an	Formulation Formeln
SARREBOURG	heures 6 Stunden	Sarrebourg	Nitting	$Q_{j+6h}^{prévu} = 1.742P + 1.093Q_j - 0.145Q_{j-6h}$
	heures 6 Stunden	Sarrebourg Postroff	Nitting	$Q_{j+6h}^{prévu} = 0.488Q_j^K + 0.593Q_{j-2h}^S - 0.499Q_{j-4h}^S - 0.547Q_{j-6h}^S - 0.623Q_j^N - 0.14P_j^N - 0.065P_{j-2h}^N - 0.57P_{j-4h}^N$
KESKASTEL	heures 6 Stunden	Sarrebourg Postroff	Mittersheim	$Q_{j+6h}^{prévu} = 0.6054Q_j^K + 0.6558Q_j^S + 0.6235Q_j^I + 1.296P_j^M + 0.586P_{j-2h}^M + 0.7679P_{j-4h}^M + 0.82P_{j-6h}^M$
	heures 16 Stunden	Sarrebourg Postroff	Mittersheim	$Q_{j+12h}^{prévu} = 0.4888Q_j^K + 0.5506Q_j^S + 0.7924Q_j^I + 3.622P_j^M + 2.306P_{j-2h}^M + 1.433P_{j-4h}^M + 2.106P_{j-6h}^M + 1.666P_{j-8h}^M + 0.899P_{j-10h}^M$
SARREALBE	heures 8 Stunden	Keskastel prévu à 6h/ vorhergesagt für 6 Stunden Rech	Kappelkinger	$Q_{j+8h}^{prévu} = 1.07Q_{j+6h}^{prévu,K} + 0.71Q_j^A + 3.491P_{j+6h}^{Ka} + 1.710P_{j-2h}^{Ka} + 0.65P_{j-4h}^{Ka} + 1.4P_{j-6h}^{Ka}$
	heures 14 Stunden	Keskastel prévu à 12h/ vorhergesagt für 12 Stunden Rech	Kappelkinger	$Q_{j+14h}^{prévu} = 1.224Q_{j+12h}^{prévu,K} + 0.29Q_j + 4.094P_{j+12h}^{Ka} + 1.766P_{j-2h}^{Ka} + 1.9931P_{j-4h}^{Ka} + 1.014P_{j-6h}^{Ka} + 0.686P_{j-8h}^{Ka} + 1.014P_{j-10h}^{Ka}$
WITTRING	heures 6 Stunden	Voir prévision Sarreinsming Siehe Vorhersage Sarreinsming		
	heures 12 Stunden	Voir prévision Sarreinsming Siehe Vorhersage Sarreinsming		
SARREINSMING	heures 6 Stunden	Rech Keskastel Oermingen		1) Hayami: $Q_{j+6h}^{prévu} = 0.6Q_j^O + 0.4Q_{j-2h}^O + 0.3(Q_{j-2h}^R + Q_{j-2h}^K + Q_{j-4h}^K) + 0.3(Q_{j-4h}^O + Q_{j-6h}^K) + 0.25Q_{j-2h}^R + 0.2(Q_{j-3h}^R + Q_j^K)$
	heures 12 Stunden	Rech Keskastel Oermingen		2) Modèle autorégressif/Autoregressives Modell: $Q_{j+6h}^{prévu} = 0.668Q_j^S + 0.205Q_j^K + 0.6567Q_j^R + 0.4856Q_j^E$

Tableau 5.4.2 Bilan des stations de prévision

Tabelle 5.4.2 Bilanz der Vorhersagestationen

Service de la Navigation à Sarreguemines qui fait les prévisions toutes les deux heures sur un micro-ordinateur GOUPIL 2.

5.4.2 Résultats de la prévision du 24 au 31 mai 1983

Les résultats des calculs de »prévision« des débits de la Sarre effectués pour la crue survenue du 24 au 31 mai 1983 sont exposés dans ce paragraphe.

La crue de mai 1983 a permis de tester et d'ajuster le modèle de prévision à partir des données du réseau de base (limnigraphiques et pluviographiques).

Les résultats présentés ci-dessous concernent la station de Sarreinsming qui est celle située le plus en aval sur la Sarre. Les autres stations de prévisions sont Keskastel, Sarralbe et Wittring.

5.4.2.1 Résumé de la méthode

La prévision à 6 heures des débits de crue de la Sarre à Sarreinsming se base sur les débits constatés aux stations de Keskastel (Sarre), de Rech (Albe) et d'Oermingen (Eichel).

La formule de prévision est la suivante:

$$Q_{j+6h}^S = Q \text{ à Sarreinsming à } j+6h = \\ 0,8892 \cdot Q_j^K + 0,049 \cdot Q_{j-2}^K + 0,1425 \cdot Q_{j-4}^K \\ + 0,1994 \cdot Q_{j-6}^K + 0,4047 \cdot Q_j^R + 0,5169 \cdot Q_{j-2}^R \\ + 0,2694 \cdot Q_{j-3}^R + 0,2958 \cdot Q_j^O + 0,6491 \cdot Q_{j-2}^O \\ + 0,763 \cdot Q_{j-4}^O - 13,5$$

5.4.2.2 Résultats

La figure 5.4.2 expose les résultats des calculs de la prévision à la station de Sarreinsming ainsi que les hauteurs et les débits réellement observés à cette station pour la période du 24 au 31 mai 1983.

Pour la prévision à 6 heures, on a constaté que le débit de pointe prévu a été sous-estimé de 16 m³/s (442 m³/s au lieu de 458 m³/s, soit 3%). Ceci correspond à une hauteur prévue inférieure de 9 cm à la hauteur observée. Il ressort de ces résultats que la prévision à Sarreinsming à 6 heures est assez bonne pour la crue considérée, en ce qui concerne les niveaux maxima atteints, bien que les débits prévus soient légèrement inférieurs aux débits observés.

vice de la Navigation in Sarreguemines zentral erfaßt, wo die Vorhersagen zweistündlich auf einem Micro-computer GOUPIL 2 erfolgen.

5.4.2 Ergebnisse der Vorhersage des Hochwassers vom 24. bis 31. Mai 1983

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der Berechnungen der Abflußvorhersage für das Hochwasser vom 24. bis 31. Mai 1983 erläutert.

Dieses Hochwasser hat eine Überprüfung und eine Nacheichung des Vorhersagemodelles ermöglicht, wobei von den Daten des Basisnetzes (Pegelschreiber und Niederschlagsschreiber) ausgegangen wurde.

Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf die am meisten stromabwärts gelegene Station der Saar, Sarreinsming. Die anderen Vorhersagestationen sind Keskastel, Sarralbe und Wittring.

5.4.2.1 Zusammenfassung der Methode

Die Abflußvorhersage des Hochwassers auf der Saar bei Sarreinsming für 6 Stunden basiert auf den Abflüssen, welche an den Stationen Keskastel (Saar), Rech (Albe) und Oermingen (Eichel) beobachtet werden.

Für die Vorhersagen werden folgende Formeln angewandt:

$$Q_{j+6h}^S = Q \text{ in Sarreinsming für } j+6h = \\ 0,8892 \cdot Q_j^K + 0,049 \cdot Q_{j-2}^K + 0,1425 \cdot Q_{j-4}^K \\ + 0,1994 \cdot Q_{j-6}^K + 0,4047 \cdot Q_j^R + 0,5169 \cdot Q_{j-2}^R \\ + 0,2694 \cdot Q_{j-3}^R + 0,2958 \cdot Q_j^O + 0,6491 \cdot Q_{j-2}^O \\ + 0,763 \cdot Q_{j-4}^O - 13,5$$

5.4.2.2 Ergebnisse

In Abbildung 5.4.2 werden die Ergebnisse der Vorhersageberechnungen bei Sarreinsming sowie die tatsächlich beobachteten Wasserstände und Abflüsse dieser Station für den Zeitraum vom 24. bis 31. Mai 1983 dargestellt.

Für die Vorhersage für 6 Stunden, hat man festgestellt, daß der vorhergesagte Scheitelwert um 16 m³/s (= 9 cm) unterbewertet wurde (442 m³/s statt 458 m³/s, also 3%). Die Genauigkeit dieser Vorhersageberechnung wird als gut betrachtet.

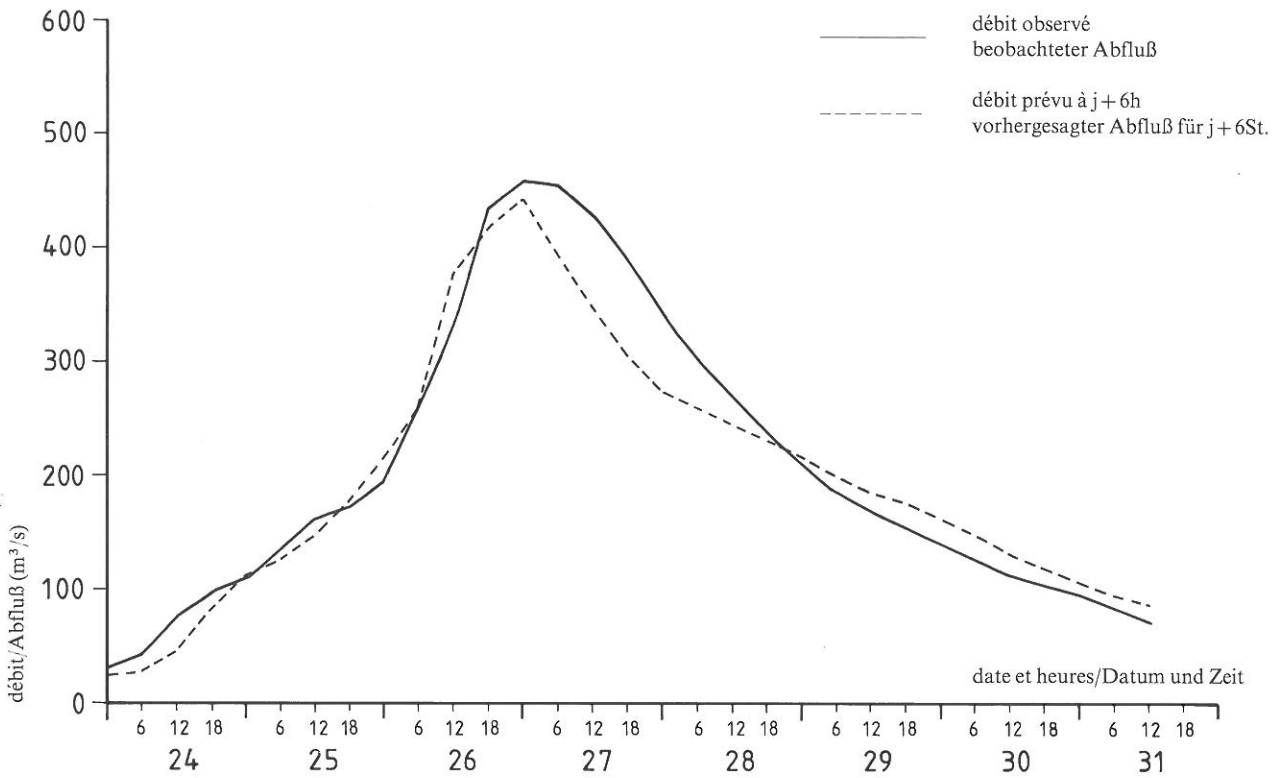
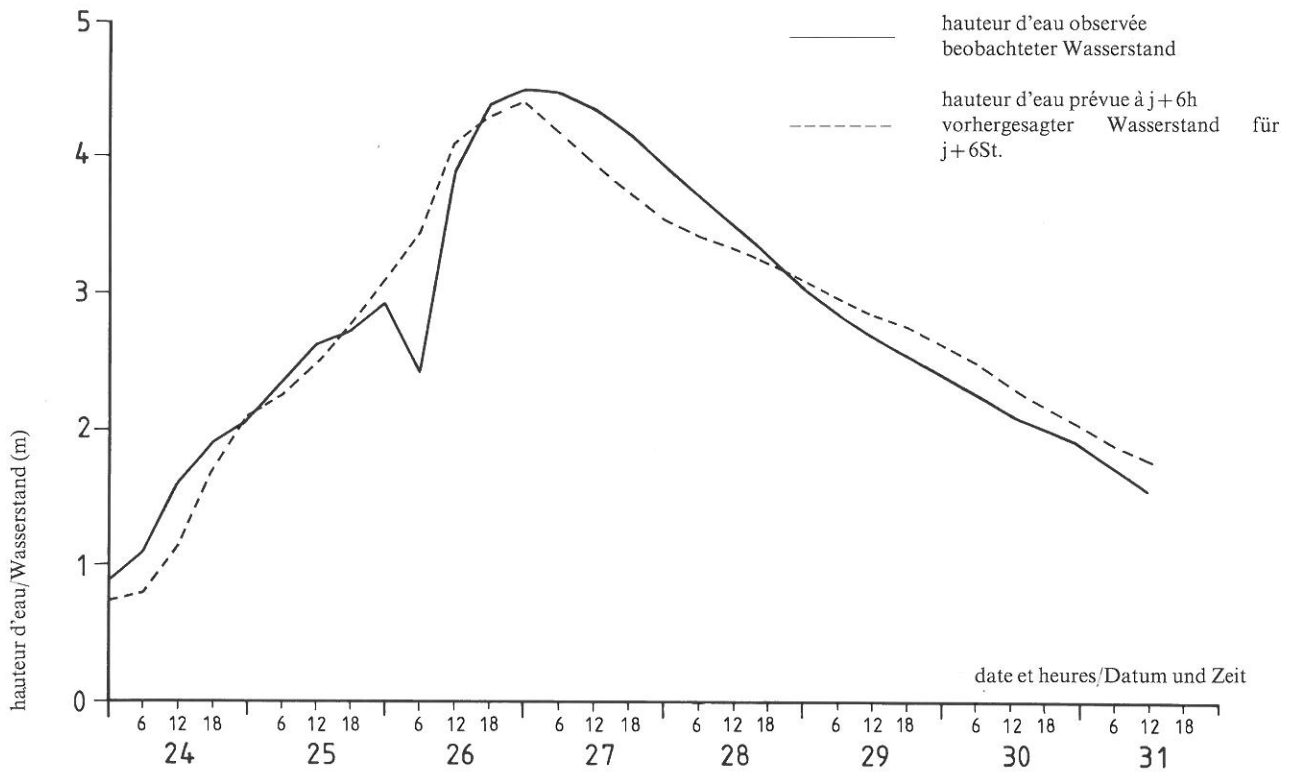


Fig. 5.4.2 Résultats des calculs de la prévision à 6h à la station de Sarreinsming ainsi que les hauteurs et les débits réellement observés pour la période du 24 au 31 mai 1983

Abb. 5.4.2 Ergebnisse der Vorhersageberechnungen für 6 Stunden bei Sarreinsming sowie die tatsächlich beobachteten Wasserstände und Abflüsse für den Zeitraum vom 24. bis 31. Mai 1983

5.5 MODÈLE À CANAUX MULTIPLES DE FILTRAGE (MKF)

5.5.1 Description du modèle à canaux multiples de filtrage pour la prévision des niveaux et des débits

5.5.1.1 Vue d'ensemble

Le modèle à canaux multiples de filtrage (modèle MKF) a été développé à l'Institut fédéral d'Hydrologie (IfH); il a été utilisé de façon opérationnelle, quotidiennement, en période de basses eaux, au cours des années 1975-1979, pour la prévision des débits à la station de Kaub/Rhin [WILKE, 1975b].

Pour des raisons d'organisation, on a renoncé à interrompre les prévisions en périodes de débits moyens et même en période de crue, de sorte qu'en 1978, des prévisions furent disponibles lors des crues de mai. Ces prévisions, établies au moyen d'un filtre à canaux multiples dont les paramètres dérivent d'une série de débits d'étiage laissaient supposer que le modèle était utilisable dans le domaine des crues également.

Pour les premières prévisions, le choix s'est porté sur l'échelle limnimétrique de Coblenz (surface du bassin versant = 110075 km²), située immédiatement en aval de l'embouchure de la Moselle. En raison de conditions de retenues particulièrement complexes, il n'existe pour le moment pas de barème hauteur-débit valable. En période de crue, il est extrêmement difficile de bien saisir les conditions d'écoulement à cet endroit, car il faut tenir compte de la superposition en temps rectifiés des ondes de crue se propageant sur la Lahn, la Moselle et le Rhin.

La durée d'écoulement à partir du limnimètre de Kaub/Rhin, (45 km en amont) jusqu'à Coblenz est de six heures environ en cas de débits de crue). Cette indication a une valeur réduite comme prédicteur, car l'onde de crue de la Moselle arrive à Coblenz ordinairement un ou deux jours avant l'onde de crue du Rhin, de sorte que la crue se produit en général à Coblenz plus tôt qu'à Kaub. Par contre, pendant la période des crues extrêmes, en avril et mai 1983 les deux ondes de crue arrivèrent simultanément à l'échelle limnimétrique de Coblenz.

Au début de 1980, on a essayé de produire des prévisions de hauteurs d'eau avec 6, 12, 18 et 24 heures d'avance, uniquement sur la base des fluctuations des hauteurs d'eau pendant six heures aux stations limnimétriques du Rhin, de la Lahn et de la Moselle. En 1980 est réalisée la première prévision opérationnelle des crues de février [WILKE, 1984]. Celles-ci furent les premières crues extrêmes depuis 1970.

5.5 MEHRKANALFILTERMODELL (MKF)

5.5.1 Modellbeschreibung der Mehrkanalfiltration zur Wasserstands- und Abfluvorhersage

5.5.1.1 Überblick

Das Mehrkanalfiltermodell MKF wurde in der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) entwickelt und in den Jahren 1975-1979 täglich bei Niedrigwasser zur Abfluvorhersage am Rheinpegel Kaub operationell eingesetzt [WILKE, 1975b].

Aus organisatorischen Gründen wurden die Vorhersagen im Mittel- und Hochwasserbereich nicht unterbrochen. So lagen z.B. im Jahre 1978 für das Maihochwasser Abfluvorhersagen vor, erstellt mit einem Mehrkanalfilter, dessen Parameter aus einem Abflußkontinuum im Niedrigwasserbereich berechnet worden waren. Diese »Hochwasservorhersagen« ließen aber vermuten, daß das Modell auch in diesem Bereich einsetzbar sein müßte.

Als erster Vorhersagepegel wurde der Rheinpegel Koblenz (Fläche des Einzugsgebietes = 110075 km²) ausgewählt, der unmittelbar oberhalb der Mündung der Mosel liegt. Wegen der unübersichtlichen Rückstauverhältnisse gibt es z.Zt. keine gültige Abflußtabelle. Bei Hochwasser ist es äußerst schwierig, das Abflußverhalten am Pegel Koblenz zu erfassen, da die zeitgerechte Überlagerung der in der Lahn, der Mosel und dem Rhein ablaufenden Hochwasserwellen berücksichtigt werden muß.

Die Fließzeit vom ca. 45 km oberhalb gelegenen Rheinpegel Kaub bis Koblenz beträgt etwa sechs Stunden (bei Hochwasser). Dieser Wert hat wenig Aussagekraft, weil meistens die Moselwelle ein bis zwei Tage früher als die Rheinwelle in Koblenz eintrifft, so daß in der Regel der Hochwasserscheitel am Pegel Koblenz früher als am Pegel Kaub erreicht wird. Bei den extremen Hochwasserereignissen im April und Mai 1983 trafen dagegen beide Wellen zeitgleich am Pegel Koblenz ein.

Anfang 1980 wurde der Versuch unternommen, allein auf der Basis von sechs-stündlichen Wasserstandsänderungen an Rhein-, Lahn- und Moselpegeln Wasserstandsvorhersagen am Pegel Koblenz für 6, 12, 18 und 24 Stunden zu erstellen. Erstmals wurde das Februarhochwasser 1980 operationell vorhergesagt [WILKE, 1984]. Es war zu dieser Zeit das erste extreme Hochwasser seit 1970.

Depuis, le domaine d'utilisation du modèle à filtre multicanal a été continuellement élargi. Dès le début de 1982, on prépare des prévisions de crue opérationnelles pour les limnimètres de Speyer, Mannheim, Worms, Mayence, Bingen, Kaub, Coblenz, Andernach, Bonn, Cologne, Dusseldorf, Ruhrort, Wesel, Rees et Emmerich sur le Rhin [WILKE, 1985].

5.5.1.2 Le modèle MKF

Ce modèle analyse les caractéristiques de transmission d'un système hydrologique (p.ex. celles d'un bassin fluvial ou d'un tronçon de rivière entre deux limnimètres) sur la base de la charge (p.ex. précipitation efficace ou débit à la station limnimétrique d'amont) et du résultat (p.ex. écoulement direct ou débit à la station limnimétrique d'aval) sous une forme intégrale, à l'aide d'une fonction de transfert. Cette dernière est directement dérivée de la charge et du résultat. Dans le cas où la fonction de transfert est déjà connue, la sortie du système s'obtient par convolution linéaire (identique à la superposition, en physique) de la fonction de transfert avec la courbe de charge, discrète et à pas constants, en entrée. Un tel modèle est appelé modèle du type bloc. Par analogie avec la technique des communications on considère un système de transmission comme un filtre qui transfère une fonction d'entrée discrète donnée, en une fonction de sortie discrète précédemment définie. Le système de transmission est complètement décrit par sa fonction de transfert.

Au cas où le système a plus d'une entrée, on a affaire à un filtre à canaux multiples. Une fonction de transfert est assignée à chaque entrée du système. La sortie du système est obtenue comme somme des convolutions des fonctions de transfert avec les entrées du système, correspondantes.

Les fonctions de transmission sont déterminées selon la méthode des moindres carrés, en calculant les valeurs de fonction exclusivement sur la base des covariances suivantes,

- autocovariances des entrées de système particulières,
- covariances croisées des entrées de système et
- covariances des sorties de système croisées avec chaque entrée de système.

La longueur des fonctions de transfert est identique au décalage temporel maximum des covariances (détails complets dans WILKE, 1984).

Une prévision de la sortie du système peut être obtenue p.ex. par la prévision de toutes les entrées du système (obtenue à l'aide d'autres procédés appropriés) pour la même période prévisionnelle, suivie d'une convolution avec les fonctions de transfert, déjà

Danach wurde der Anwendungsbereich des Mehrkanalfiltermodells ständig erweitert. Seit Anfang 1982 werden für die Rheinpegel Speyer, Mannheim, Worms, Mainz, Bingen, Kaub, Koblenz, Andernach, Bonn, Köln, Düsseldorf, Ruhrort, Wesel, Rees und Emmerich Hochwasservorhersagen operationell erstellt [WILKE, 1985].

5.5.1.2 Das Modell MKF

Dieses Modell analysiert die Übertragungseigenschaften eines hydrologischen Systems (z.B. Einzugsgebiet oder Gewässerabschnitt zwischen zwei Pegeln) aus der Belastung (z.B. abflußwirksamer Niederschlag oder Abfluß am oberen Pegel) und dem Ergebnis (z.B. Direktabfluß oder Abfluß am unteren Pegel) in integraler Form mit Hilfe einer Übertragungsfunktion. Die Übertragungsfunktion wird direkt aus der Belastung und dem Ergebnis berechnet. Bei bekannter Übertragungsfunktion ergibt sich der Systemausgang durch lineare Faltung (identisch mit dem physikalischen Begriff der Superponierung) der Übertragungsfunktion mit der Ganglinie der diskret und äquidistant vorliegenden Belastung als Systemeingang. Ein solches Modell bezeichnet man als Blockmodell. In Analogie zur Nachrichtentechnik möge als Filter ein Übertragungssystem (hier linear und zeitinvariant) verstanden werden, das eine gegebene diskrete Eingangsfunktion in eine gewünschte vorgegebene diskrete Ausgangsfunktion überführt. Das Übertragungssystem wird vollständig durch seine Übertragungsfunktion beschrieben.

Bei mehr als einem Systemeingang liegt ein sog. Mehrkanalfilter vor. Jedem Systemeingang wird eine Übertragungsfunktion zugeordnet. Der Systemausgang ergibt sich als Summe der Faltungen der einzelnen Übertragungsfunktionen mit den zugehörigen Systemeingängen.

Die Übertragungsfunktionen werden nach der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt, wobei die Funktionswerte ausschließlich aus Kovarianzen (nicht normierten Korrelationen) berechnet werden, dies sind:

- Autokovarianzen der einzelnen Systemeingänge,
- Kreuzkovarianzen der Systemeingänge und
- Kreuzkovarianzen des Systemausgangs mit jedem Systemeingang.

Die Länge der Übertragungsfunktionen ist gleich der maximalen Zeitverschiebung bei der Berechnung der Kovarianzen (ausführliche Herleitung in WILKE, 1984).

Eine Vorhersage des Systemausgangs kann man z.B. durch Vorhersage aller Systemeingänge (mit anderen hierfür geeigneten Verfahren) um den gleichen Vorhersagezeitraum und anschließender Faltung mit der aus der Analyse des Übertragungssystems bekannten

connues par l'analyse du système de transmission. Avec comme entrées du système les précipitations efficaces et/ou les débits aux stations limnimétriques situées loin en amont, cette méthode débouche en général sur des problèmes insolubles.

Le modèle MKF suit une autre voie. Les entrées du système ne sont pas considérées simultanément, mais en rapport avec la sortie du système, décalées dans le temps de la période de prévision, les fonctions de transfert n'étant calculées qu'après. Par exemple, quand on dispose des données de mesure à intervalles $\Delta t = 6\text{h}$ et que les prévisions sont à réaliser avec 6 et 12 heures d'avance, différentes fonctions de transmission doivent être calculées chaque fois avec un retard en rapport avec toutes les entrées de $1 \cdot \Delta t$ et $2 \cdot \Delta t$.

Les fonctions de transfert sont différentes, parce qu'au cas où il y aurait un retard de $1 \cdot \Delta t$ dans la sortie du système, les covariances (unilatérales) de la sortie du système, croisées avec les entrées du système, s'annulent pour un décalage de $t = \sigma \cdot \Delta t$ et, pour un retard de $2 \cdot \Delta t$, celles pour $t = \sigma \cdot \Delta t$ et $t = 1 \cdot \Delta t$ sont éliminées. Par conséquent, la sortie du système à prévoir, peut aussi être utilisée comme entrée du système jusqu'au moment de la prévision (utilisation de la tendance de la persistance). Cette méthode peut être avantageuse lors d'une prévision des hauteurs d'eau ou des débits, dans le cas où p.ex. on n'utiliserait, en plus des données relevées sur le limnimètre de prévision, que des sommes pluviométriques comme entrées du système [WILKE, 1975a].

Pour réaliser les prévisions des hauteurs d'eau à une des stations limnimétriques du Rhin, citées au chapitre 5.5.1.1, avec 6, 12, 18 et 24 heures d'avance (jusqu'à $4 \cdot \Delta t$), quatre filtres à canaux multiples sont nécessaires. Le nombre des fonctions de transfert d'un filtre multicanal est identique à celui des limnimètres d'entrée utilisé (actuellement 15 limnimètres au maximum).

Jusqu'à la fin de l'année 1983, $15 \times 4 = 60$ filtres à canaux multiples, avec au total 500 fonctions de transferts ont été utilisés aux stations limnimétriques de prévision déjà citées.

On a calculé ces fonctions de transfert en se basant sur les variations des hauteurs d'eau observées toutes les six heures en 1978 (451 valeurs en total). Pour prévoir les changements des hauteurs d'eau, on a choisi comme entrées et sorties du système, les variations ou les différences des hauteurs d'eau déterminées à des intervalles de six heures au lieu des relevés limnigraphiques momentanés.

Chaque fonction de transfert comporte 12 valeurs, c.-à.-d. qu'on a besoin de 12 variations des hauteurs d'eau pour la convolution. Pour obtenir les données de prévision sur les hauteurs d'eau, les variations de ni-

Übertragungsfunktionen erreichen. Bei abflußwirksamen Niederschlägen und/oder Abflüssen an weit oberhalb gelegenen Pegeln als Systemeingänge entstehen i.a. nicht lösbare Probleme.

Beim Modell MKF wird ein anderer Weg beschritten. Die Systemeingänge werden nicht zeitgleich, sondern auf den um den Vorhersagezeitraum verzögerten Systemausgang bezogen und dann erst die Übertragungsfunktion berechnet. Liegen z.B. Meßwerte im zeitlichen Abstand $\Delta t = 6\text{Std.}$ vor und sollen Vorhersagen für 6 und 12 Stunden ermittelt werden, so müssen jeweils verschiedene Übertragungsfunktionen bei einer zeitlichen Verzögerung des Ausgangs gegenüber allen Eingängen von $1 \cdot \Delta t$ und $2 \cdot \Delta t$ berechnet werden.

Die Übertragungsfunktionen sind deshalb unterschiedlich, weil bei einer Verzögerung des Systemausgangs um $1 \cdot \Delta t$ die (einseitigen) Kreuzkovarianzen des Systemausgangs mit den Systemeingängen bei der Zeitverschiebung $t = \sigma \cdot \Delta t$ entfallen und bei $2 \cdot \Delta t$ diejenigen für $t = \sigma \cdot \Delta t$ und $t = 1 \cdot \Delta t$. Es kann daher auch der vorherzusagende Systemausgang bis zum Vorhersagezeitpunkt verwendet werden (Ausnutzung der sog. Erhaltungseigung). Vorteilhaft kann dies bei einer Wasserstands- oder Abflußvorhersage dann sein, wenn außer den Meßwerten am Vorhersagepegel z.B. nur Niederschlagssummen an mehreren Stationen als Systemeingänge verwendet werden [WILKE, 1975a].

Für Wasserstandsvorhersagen an einem der in Abschnitt 5.5.1.1 genannten Rheinpegel für die nächsten 6, 12, 18 und 24 Stunden (bis $4 \cdot \Delta t$) müssen vier Mehrkanalfilter vorliegen. Die Anzahl der Übertragungsfunktionen eines Mehrkanalfilters ist gleich der Anzahl der verwendeten Eingangspegel (z.Zt. maximal 15).

Bis Ende 1983 wurden für die genannten 15 Vorhersagepegel $15 \times 4 = 60$ Mehrkanalfilter mit insgesamt 500 Übertragungsfunktionen verwendet.

Berechnet wurden diese Übertragungsfunktionen aus sechsständlichen Wasserstandsänderungen aus dem Jahr 1978, dies sind insgesamt 451 Werte. Nicht die momentanen Wasserstände, sondern die im zeitlichen Abstand von sechs Stunden ermittelten Wasserstandsänderungen oder -differenzen wurden als Systemeingänge gewählt, um Wasserstandsänderungen vorherzusagen.

Jede Übertragungsfunktion besteht aus 12 Funktionswerten, d.h. es müssen bei der Anwendung 12 Wasserstandsänderungen zur Faltung vorliegen. Die mit vier Mehrkanalfiltern (jeweils bis zu 15 Übertra-

veaux prévues à l'aide de quatre filtres à canaux multiples (jusqu'à 15 fonctions de transfert chaque fois), pour les 6, 12, 18 et 24 heures prochaines, sont additionnées au relevé limnigraphique dernièrement appelé.

En calculant les fonctions de transfert, on peut utiliser les autocovariances et les covariances croisées sans pondération, ou on peut les soumettre à un lissage par application d'une »fenêtre« (fenêtre de Hanning) [WILKE, 1984]. En outre, il s'est avéré très avantageux de superposer aux entrées du système un »bruit blanc«. Dans ce cas, il n'y a pas de corrélation croisée et il en résulte seulement que les variances et autocovariances augmentent quand $t = \sigma \cdot \Delta t$. Les prévisions d'essai ont montré qu'une augmentation des variances de 5% est appropriée [HUTHMANN et WILKE, 1982; WILKE, 1984].

Dès le mois de février 1980, le modèle prévisionnel à filtre multicanal a été mis en oeuvre d'une manière opérationnelle, en périodes de crue dans le bassin du Rhin et les relevés des hauteurs d'eau sont enregistrés chaque fois. Au début de 1983, afin d'utiliser cette information supplémentaire, au sens de la conception du modèle, on recalcule les fonctions de transfert pour quelques filtres à canaux multiples sur la base du volume de données ainsi augmenté. Pour de nouveaux calculs, on dispose, en plus des données obtenues en 1978, de relevés limnigraphiques de sept périodes de crue additionnelles avec au total 987 variations de niveaux d'eau. En utilisant les variations juxtaposées, on produit un nouvel intervalle de calcul et en convertissant les hauteurs d'eau en débits on obtient aussi un intervalle de calcul avec 987 variations de débits. Ce procédé permet de réaliser non seulement la prévision des changements des hauteurs d'eau, mais aussi celle des variations des débits.

5.5.1.3 Données nécessaires au modèle MKF

Le modèle à canaux multiples de filtrage exige des relevés limnigraphiques journaliers toutes les 6 heures sur les 36 limnigraphes représentés à la figure 5.5.1. En plus des stations sur le Rhin, on utilise pour les calculs un choix de limnimètres des affluents, soit le Neckar, le Main, la Nahe, la Sarre, la Sûre, la Moselle, la Lahn et la Sieg. Les noms de ces 15 stations limnimétriques prévisionnelles se trouvent soulignées à la figure 5.5.1. Contrairement au modèle RHEINA, le modèle MKF n'utilise ni données météorologiques ni prévisions d'entrée.

Les appareils du Centre de prévision de l'IfH, mentionnés au paragraphe 5.6.1.4 de la description du modèle RHEINA, sont disponibles pour fournir les données au modèle MKF.

On peut interroger 16 d'entre les 36 stations limnimétriques indiquées à la figure 5.5.1, à l'aide du système

gungsfunktionen) vorhergesagten Wasserstandsänderungen für die nächsten 6, 12, 18 und 24 Stunden werden zum zuletzt abgerufenen Wasserstand am Vorhersagepegel addiert, um die vorhergesagten Wasserstände zu erhalten.

Bei der Berechnung der Übertragungsfunktionen kann man die genannten Auto- und Kreuzkovarianzen ungewichtet verwenden oder mit einem sog. Datenfenster (hier Hanning-Fenster) glätten [WILKE, 1984]. Weiterhin hat es sich als äußerst vorteilhaft erwiesen, die Systemeingänge mit sog. weißem Rauschen zu überlagern. Dieses ist nicht kreuzkorreliert und wirkt sich nur in einer Erhöhung der Varianzen, den Autokovarianzen bei $t = \sigma \cdot \Delta t$ aus. Testvorhersagen haben gezeigt, daß eine Erhöhung der Varianzen um 5% sinnvoll ist [HUTHMANN und WILKE, 1982; WILKE, 1984].

Seit Februar 1980 wird das Mehrkanalfiltermodell bei jedem Hochwasser im Rheingebiet operationell eingesetzt und die aktuell abgerufenen Wasserstände abgespeichert. Um diesen Informationsgewinn auch modellmäßig nutzen zu können, wurden Anfang 1983 die Übertragungsfunktionen für Mehrkanalfilter aus dem vorliegenden vergrößerten Datenkollektiv neu berechnet. Für Neuberechnungen standen außer dem Bereich aus dem Jahr 1978 weitere 7 Hochwasserperioden mit insgesamt 987 Wasserstandsänderungen zur Verfügung. Die aneinandergereihten Wasserstandsänderungen wurden als neues Berechnungsintervall gewählt und parallel hierzu durch Umrechnung der Wasserstände in Abflüsse ein Berechnungsintervall mit 987 Abflußänderungen erstellt, um sowohl Wasserstandsänderungen als auch Abflußänderungen vorhersagen zu können.

5.5.1.3 Daten für das Modell MKF

Das Mehrkanalfiltermodell benötigt sechsstündliche Wasserstände an den in Abb. 5.5.1 aufgeführten 36 Pegeln. Neben Rheinpegeln werden ausgewählte Pegel an den Nebenflüssen Neckar, Main, Nahe, Saar, Sauer, Mosel, Lahn und Sieg verwendet. Die 15 Vorhersagepegel sind unterstrichen. Im Unterschied zum Modell RHEINA gehen keine meteorologischen Daten und keine Inputvorhersagen in das Vorhersagemodell MKF ein.

Für den Datenabruf stehen die im Abschnitt 5.6.1.4 des Modells RHEINA aufgeführten Geräte in der Vorhersagezentrale der BfG zur Verfügung.

Über das automatische Meßwerterfassungs- und Übertragungssystem (OTT-Zentralstation Allgomatic)

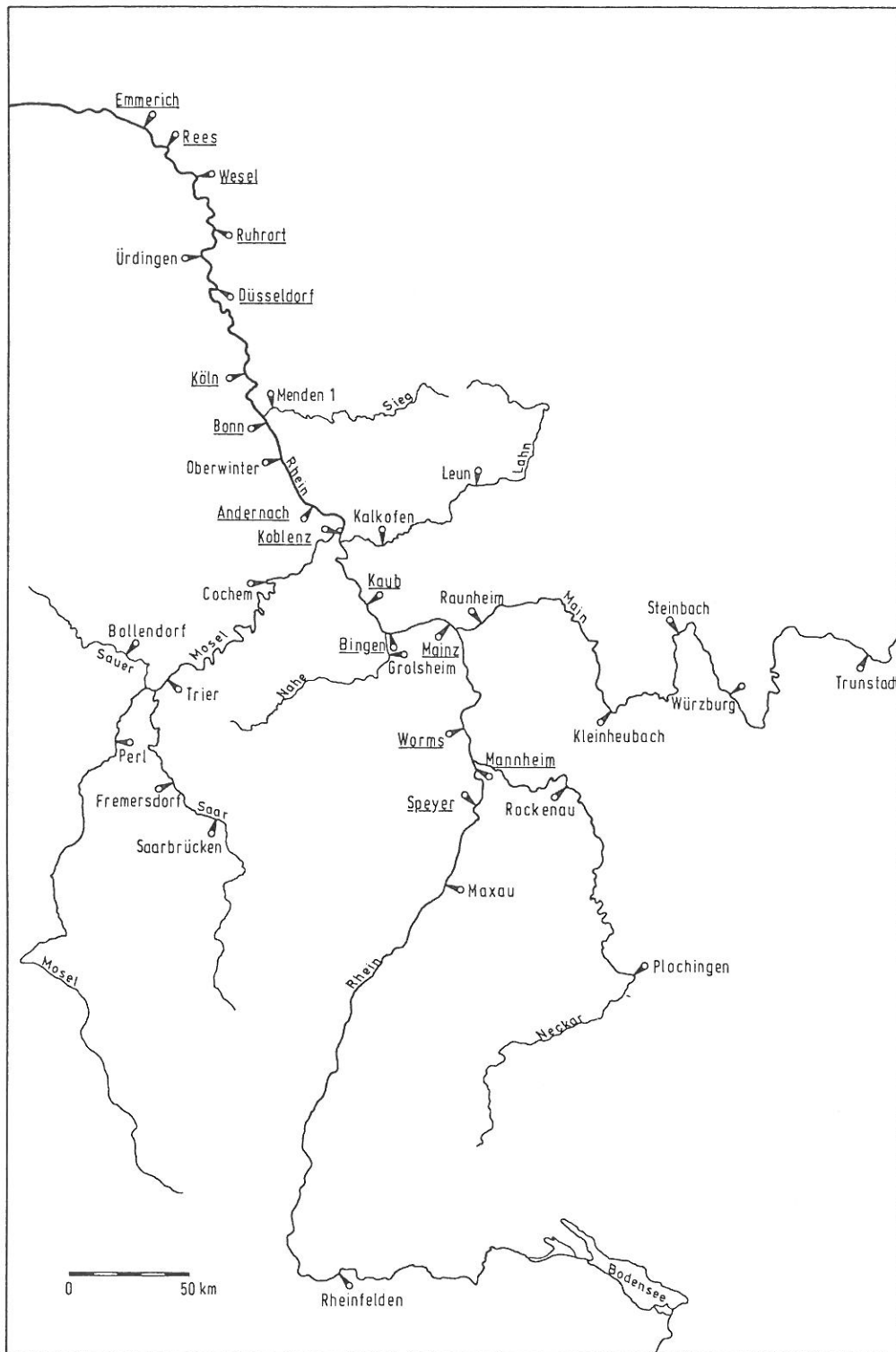


Fig. 5.5.1 Les stations utilisées pour le modèle de prévision MKF
 Les stations limnimétriques prévisionnelles sont soulignées.

Abb. 5.5.1 Benutzte Pegel für das Vorhersagemodell MKF
 Die Vorhersagepegel sind unterstrichen.

de transmission automatique de données (Station centrale OTT Allgomatic).

5.5.2 La prévision opérationnelle

5.5.2.1 Calcul et transfert des prévisions

A l'IfH, on effectue les calculs de prévision de crue à l'aide du modèle à canaux multiples de filtrage dès que l'eau atteint un niveau donné à l'un des 15 limnimètres de prévision ou à celui de Maxau, et qu'on peut supposer, sur la base de l'analyse des données météorologiques, que l'eau va continuer à monter.

Pour assurer le transfert en temps utile des prévisions de crue, conformément à ses obligations contractuelles envers l'Autorité administrative des eaux et de la navigation (WSD) pour le Sud-Ouest, et depuis le 1er février 1984, pour le Ouest également, il est nécessaire à l'IfH de commencer de bonne heure les calculs.

Pour débiter avec la prévision, 12 variations de niveau échelonnées toutes les 6 heures, doivent être disponibles, et ceci pour toutes les stations limnimétriques mentionnées à la figure 5.5.1. Ceci ne présente aucune difficulté, grâce aux 16 stations équipées du système Allgomatic, dont les niveaux d'eau à des intervalles de 15 minutes restent en mémoire pour les 4 dernières journées et peuvent être appelées en tout temps. Grâce au début très matinal de l'appel des stations, aucun défaut de prévision n'a pu être imputé jusqu'ici à un jeu de données incomplet.

Jusqu'à fin 1983, les prévisions étaient réalisées quotidiennement pour 6, 12 et 18 heures, avec un simple appel des niveaux d'eau pour 24 heures.

Dès le début de l'année 1984, cet horaire a dû être avancé d'une heure, car WSD-Ouest devait retransmettre à la radio les premières prévisions de crue du matin avant 6h15 déjà (la WSD-Sud-Ouest n'ayant à le faire qu'une heure plus tard environ). Ainsi donc les prévisions du modèle MKF, établies par l'IfH doivent être transmises téléphoniquement à la WSD-Ouest, aussi bien qu'à la WSD-Sud-Ouest avant 6, 12 et 18 heures.

Le matin, il est nécessaire de rattraper les calculs qui auraient dû être faits sur la base des niveaux à 23 heures, puis de les poursuivre avec les données de 5 heures du jour-même. L'expérience a montré qu'il était avantageux que ce soit la WSD-Ouest qui, le matin, interroge par le système de transmission automatique Allgomatic, les stations de Bonn, Cologne, Ruhrort, Wesel, Rees et Emmerich pour ensuite les retransmettre à l'IfH environ avant 5h20.

Le travail à l'IfH commence à 4h45 du matin, avec

können z.Zt. 16 der in Abb. 5.5.1 enthaltenen 36 Pegelabgerufen werden.

5.5.2 Die operationelle Vorhersage

5.5.2.1 Berechnung und Weitergabe der Vorhersagen

In der BfG werden mit dem Mehrkanalfiltermodell Hochwasservorhersagen dann berechnet, wenn an einem der 15 Vorhersagepegel und/oder am Pegel Maxau die Meldehöhe erreicht ist und nach Analyse meteorologischer Daten ein weiterer Anstieg angenommen werden muß.

Der relativ frühe Beginn der Vorhersageberechnungen ist notwendig, damit die BfG ihrer gegenüber der Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Südwest und seit dem 1. Februar 1984 auch gegenüber der WSD West eingegangenen Verpflichtung zur termingerechten Weitergabe von Hochwasservorhersagen gerecht werden kann.

Bei Vorhersagebeginn müssen 12 sechsstündliche Wasserstandsänderungen an allen in Abbildung 5.5.1 aufgeführten Pegeln vorliegen. Bei den mit Allgomatic ausgerüsteten 16 Pegeln ist dies kein Problem, da hier die Wasserstände (im zeitlichen Abstand von 15 Minuten) der letzten vier Tage abgespeichert und abrufbar sind. Aufgrund des frühzeitigen Beginns des Datenabrufs ist es bisher noch zu keinem Vorhersageausfall wegen nicht vollständiger Datensätze bei Hochwasserbeginn gekommen.

Vorhersagezeitpunkte waren bis Ende 1983 täglich 6, 12 und 18 Uhr. Um 24 Uhr wurden nur die Wasserstände abgerufen.

Mit Beginn des Jahres 1984 mußten diese Zeitpunkte um 1 Stunde vorverlegt werden, da die WSD West die ersten Hochwasservorhersagen morgens bis 6.15 Uhr an den Rundfunk weiter zu geben hat (WSD Südwest ca. eine Stunde später). Die in der BfG mit dem Mehrkanalfiltermodell berechneten Vorhersagen sind täglich bis ca. 6, 12 und 18 Uhr an die WSD West und WSD Südwest telefonisch zu übermitteln.

Morgens müssen Vorhersagen mit den 23 Uhr-Wasserständen vom Vortag nachgeholt und mit den 5 Uhr-Werten vom Vorhersage tag aktuell berechnet werden. Hierbei hat es sich bewährt, daß die WSD West morgens die 23 Uhr- und 5 Uhr-Wasserstände an den mit dem automatischen Meßwerterfassungs- und Übertragungssystem Allgomatic ausgerüsteten Pegeln Bonn, Köln, Ruhrort, Wesel, Rees und Emmerich abruft und bis ca. 5.20 Uhr an die BfG weiterleitet.

In der BfG wird um 4.45 Uhr mit dem Abruf der

l'appel des niveaux de la veille à 23h, mémorisés par l'équipement Allgomatic des 10 stations restantes.

A 5 heures, on appelle téléphoniquement 20 stations limnimétriques (équipées de répondeurs). Ensuite on doit demander les valeurs de 5 heures aux 10 limnigraphes du système Allgomatic et introduire dans l'ordinateur les valeurs mesurées à un de total 36 limnigraphes. Depuis 1980, les calculs sont effectués à l'IfH sur un petit calculateur Dietz Minical 621, et c'est en février 1984 que pour la première fois des prévisions furent effectuées, en parallèle, sur le gros ordinateur Siemens 7561 de l'Autorité administrative des eaux et de la navigation à Karlsruhe.

Actuellement, en moyenne deux prévisions sont effectuées pour chacune des stations visées (en utilisant différentes stations d'entrée, ou des niveaux et des débits modifiés) et ceci pour les prochaines 6, 12, 18, 24 et parfois même 36 heures. Au total, après un passage du programme, 180 prévisions à 6 heures, doivent être reportées dans des listes préétablies. Le matin, cela représente un total de 360 prévisions individuelles, en raison du rattrapage des prévisions de 23 heures de la veille. Ces listes sont prêtes vers 5 heures 55 du matin.

L'opérateur dispose en moyenne de 5 minutes pour examiner les prévisions individuelles de niveaux, dont 102 (le matin 204) sont du ressort de la WSD-Ouest et 78 (le matin 156) concernent la WSD-Sud-Ouest. Il s'agit respectivement des stations à prévisions entre Bonn et Emmerich et de celles entre Speyer et Andernach.

Le calcul des prévisions suivantes est généralement terminé 45 minutes après les appels de niveaux de 11 et 17 heures. C'est ainsi que les prévisions pour les 15 stations choisies sont révisées trois fois par jour, et chaque fois pour les 24 prochaines heures.

Il est réjouissant de constater que les deux Autorités administratives des eaux et de la navigation concernées établissent elles aussi leurs propres prévisions, en utilisant les débits de stations situées respectivement en amont des stations à prévisions, de même qu'en totalisant les apports latéraux, compte tenu des délais dûs aux temps d'écoulement des ondes de crue ainsi que des correspondances établies entre échelles limnimétriques. A partir de ces prévisions là et de celles du modèle MKF, les prévisions de niveau définitives à 24 heures sont mises au point par concertation téléphonique entre l'IfH et la WSD-Sud-Ouest et la WSD-Ouest, avant d'être diffusées.

5.5.2.2 *Données erronées et stations en panne*

La hauteur d'eau effective à une des stations choi-

gespeicherten 23 Uhr-Wasserstände vom Vortag an weiteren 10 mit Allgomatic ausgestatteten Pegeln begonnen.

Um 5 Uhr sind 20 Pegel telefonisch anzuwählen (Anrufbeantworter), danach müssen die 5 Uhr Werte der 10 Allgomatic-Pegel abgerufen und die Meßwerte von insgesamt 36 Pegeln in den Rechner eingegeben werden. Seit 1980 erfolgte die Berechnung auf einem Kleinrechner (Dietz Minical 621) in der BfG, im Februar 1984 wurden die Vorhersagen erstmals parallel auf dem Großrechner der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (Siemens 7561) in Karlsruhe berechnet.

Für jeden Vorhersagepegel werden z.Zt. im Mittel 2 Vorhersagen (Verwendung verschiedener Eingangspiegel oder Berechnungen aus Wasserstands- und Abflußänderungen) für die nächsten 6, 12, 18, 24 und z.T. bis 36 Stunden erstellt. Insgesamt müssen nach einem Programmdurchlauf 180 berechnete sechsstündliche Einzelvorhersagen in vorbereitete Listen übertragen werden. Morgens sind es mit der nachzuholenden 23 Uhr-Vorhersage vom Vortrag 360 Einzelvorhersagen. Diese Listen sind gegen 5.55 Uhr fertiggestellt.

Dem Modellanwender bleiben durchschnittlich 5 Minuten Zeit, sich die Einzelvorhersagen anzusehen, von denen 102 (morgens 204) bzw. 78 (morgens 156) vorhergesagte Wasserstände in den Zuständigkeitsbereich der WSD West (Vorhersagepegel Bonn bis Emmerich) bzw. Südwest (Vorhersagepegel Speyer bis Andernach) fallen.

Die weiteren Vorhersagen nach Abruf der 11- und 17-Uhr-Wasserstände sind in der Regel 45 Minuten nach den Abrufterminen fertiggestellt, so daß täglich dreimal die Vorhersagen an allen 15 Vorhersagepegeln für jeweils 24 Stunden im voraus aktualisiert werden.

Positiv anzumerken ist, daß die Wasser- und Schifffahrtsdirektionen eigene Vorhersagen unter Verwendung von Abflüssen oberhalb des jeweiligen Vorhersagepegels gelegenen Pegeln und zeitgerechter Aufsummierung seitlicher Zuflüsse unter Berücksichtigung der Laufzeiten der Hochwasserwellen bzw. mit Pegelbezugslinien erstellen. Auf der Basis dieser Vorhersagen und der Berechnungen mit dem Mehrkanalfiltermodell werden die für einen Vorhersagezeitraum von 24 Stunden festzulegenden Wasserstandsvorhersagen telefonisch zwischen der BfG und der WSD Südwest bzw. West abgesprochen und von diesen weiterverbreitet.

5.5.2.2 *Fehlerhafte Daten und Stationsausfall*

Die zum Vorhersagezeitpunkt aktuell abgerufenen

sies, appelée au moment de la prévision doit toujours être comparée à la prévision calculée 6 heures auparavant. L'écart constaté ne dépasse pas en général 5 cm. En cas de dépassement de ce seuil avec simultanément, une bonne concordance des prévisions établies pour ce même instant, 6, 12, 18 et 24 heures auparavant, un contrôle immédiat du fonctionnement de la station limnimétrique est déclenché.

L'opérateur doit alors se décider s'il faut conserver la valeur douteuse dans la suite des calculs, ou plutôt donner la préférence à la valeur de prévision déterminée 6 heures auparavant.

Par ailleurs, au cas où elle provient d'un des limnimètres sans prévision, il reste toujours la possibilité de renoncer à utiliser une valeur de niveau paraissant aberrante. Le modèle fonctionnera alors avec un filtre à canaux multiples dans lequel la station douteuse n'intervient pas en entrée. On procédera de la même façon en cas de panne complète d'une station.

S'agissant par contre d'une station à prévision en cas de panne due par exemple à un court-circuit, comme ce fut le cas à Coblenz et à Cologne lors des inondations provoquées par la crue d'avril 1983, on devra se contenter de lectures directes de l'échelle, où se résoudre à utiliser la valeur prévue 6 heures auparavant au lieu des valeurs manquantes.

5.5.2.3 Exemple de prévisions opérationnelles

Les figures 5.5.2 à 5.5.4 montrent des prévisions opérationnelles établies pour 3 des 15 stations à prévision, soit les stations de Speyer et Coblenz en mai 1983 et celle de Wesel en février 1984. Pour reconstituer une prévision, il suffit, à partir de l'instant choisi sur l'hydrogramme des niveaux, de relier entre eux les symboles correspondants, dont la légende figure dans la marge supérieure.

Pour réaliser la prévision du niveau du Rhin à Speyer on utilise actuellement comme entrée les niveaux de 3 stations seulement; soit les niveaux du Rhin à Maxau et à Rheinfelden, ainsi que le niveau du Neckar à Rockenau, en raison de l'influence sur l'échelle de Speyer que provoque le remou de cet affluent.

Les durées d'écoulement en période de crue sont de l'ordre de grandeur d'un jour entre Rheinfelden et Maxau et de 6 heures entre Maxau et Speyer.

Les prévisions, réalisées jusqu'ici dans le domaine des crêtes d'ondes de crues, ont montré que l'on peut effectuer des prévisions pour Speyer, au-delà de ces périodes particulières. Alors que l'on ne retransmet des prévisions que pour les 24 prochaines heures, les calculs à usages internes couvrent en fait une durée de 36 heures.

Wasserstände an den Vorhersagepegeln werden stets mit den vor sechs Stunden erstellten Vorhersagen für diesen Zeitpunkt verglichen. Die Abweichungen liegen i.a. bei 0 bis 5 cm. Bei größeren Abweichungen und gleichzeitiger Übereinstimmung der vor 6, 12, 18 und 24 Stunden berechneten Vorhersagen für diesen Zeitpunkt wird eine sofortige Überprüfung des Pegels veranlaßt.

In diesem Falle entscheidet der Modellanwender, ob der vielleicht fehlerhafte Meßwert oder der vor sechs Stunden vorhergesagte Wert für die weiteren Berechnungen verwendet wird.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, bei offensichtlich falsch übermittelten Wasserständen an einem Pegel, der kein Vorhersagepegel ist, diesen im Vorhersagemodell unberücksichtigt zu lassen (Verwendung von Mehrkanalfiltern, die diesen Pegel nicht als Eingangspiegel verwenden). Ebenso ist bei einem Stationsausfall zu verfahren.

Fällt z.B. durch Kurzschluß wegen Überflutung ein Vorhersagepegel aus (z.B. die Pegel Koblenz und Köln beim Aprilhochwasser 1983), so muß auf Lattenablesung übergegangen werden, oder es sind die jeweils vor sechs Stunden erstellten Vorhersagen anstelle der ausgefallenen Meßwerte einzusetzen.

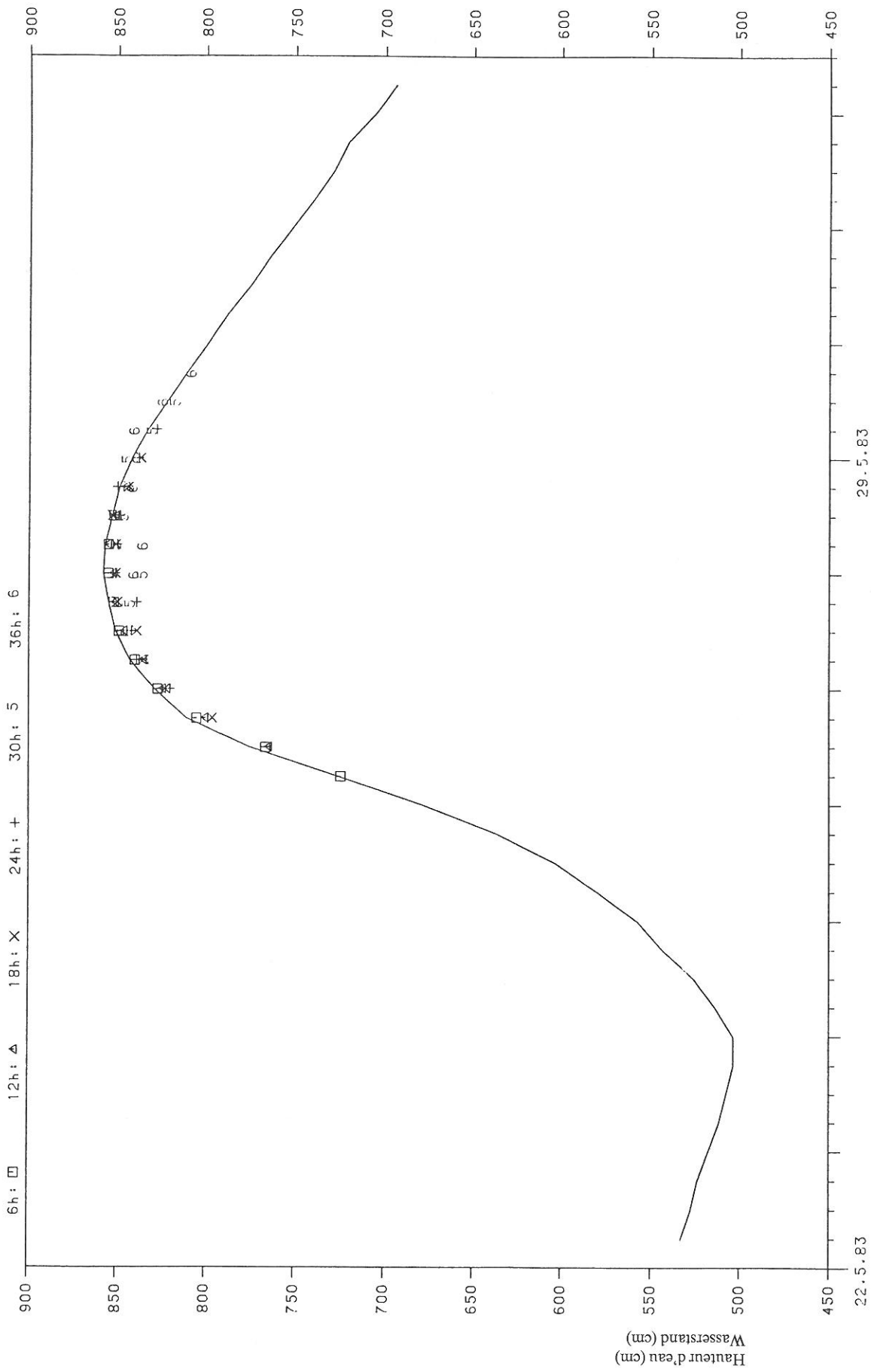
5.5.2.3 Beispiele operationeller Vorhersagen

In den Abbildungen 5.5.2–5.5.4 sind operationelle Vorhersagen an 3 der 15 Vorhersagepegel dargestellt, am Pegel Speyer und Koblenz vom Mai 1983 und am Pegel Wesel vom Februar 1984. Zum Nachvollziehen einer Vorhersage sind, ausgehend von der Wasserstandsganglinie am Vorhersagezeitpunkt, die am oberen Bildrand aufgeführten Symbole nacheinander zu verbinden.

Für die Vorhersage am Rheinpegel Speyer werden z.Zt. nur 3 Systemeingänge verwendet, es sind die Wasserstände an den Rheinpegeln Maxau und Rheinfelden sowie am Neckarpegel Rockenau (wegen Beeinflussung der Wasserstände am Pegel Speyer durch Rückstau des Neckars).

Die Fließzeiten liegen bei Hochwasser von Rheinfelden bis Maxau im Bereich von einem Tag und von Maxau bis Speyer bei ca. sechs Stunden.

Bisherige Vorhersagen haben gezeigt, daß im Scheitelbereich einer Hochwasserwelle am Pegel Speyer auch über diesen Zeitraum hinaus vorhergesagt werden kann. Während Vorhersagen bis zu 24 Stunden weitergegeben werden, gehen interne Berechnungen bis zu einem Vorhersagezeitraum von 36 Stunden.



29.5.83

22.5.83

Fig. 5.5.2 Prédiction effective des hauteurs d'eau à la station limnimétrique de Speyer/Rhin

Abb. 5.5.2 Aktuelle Wasserstandsvorhersage am Pegel Speyer/Rhein

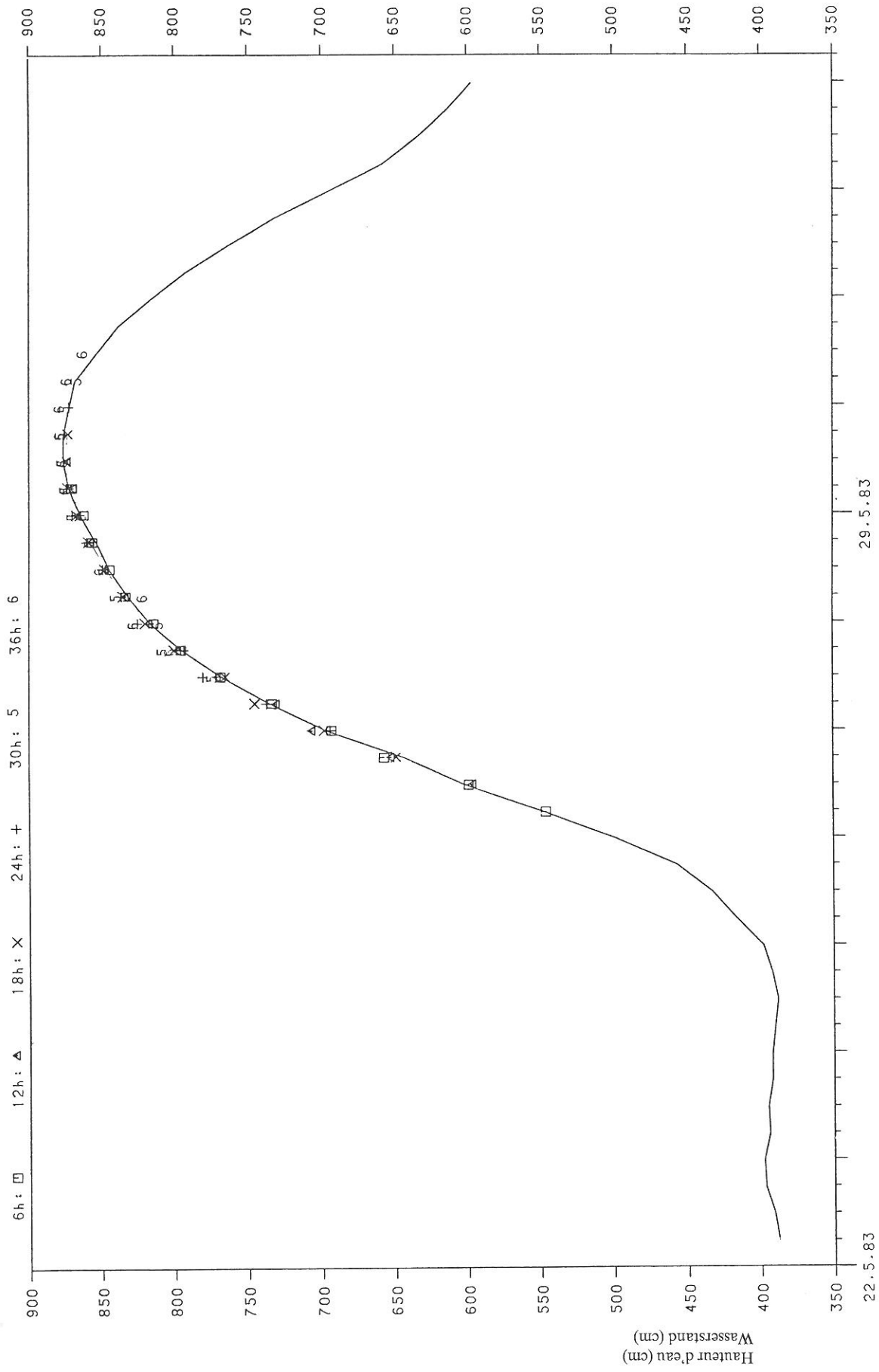
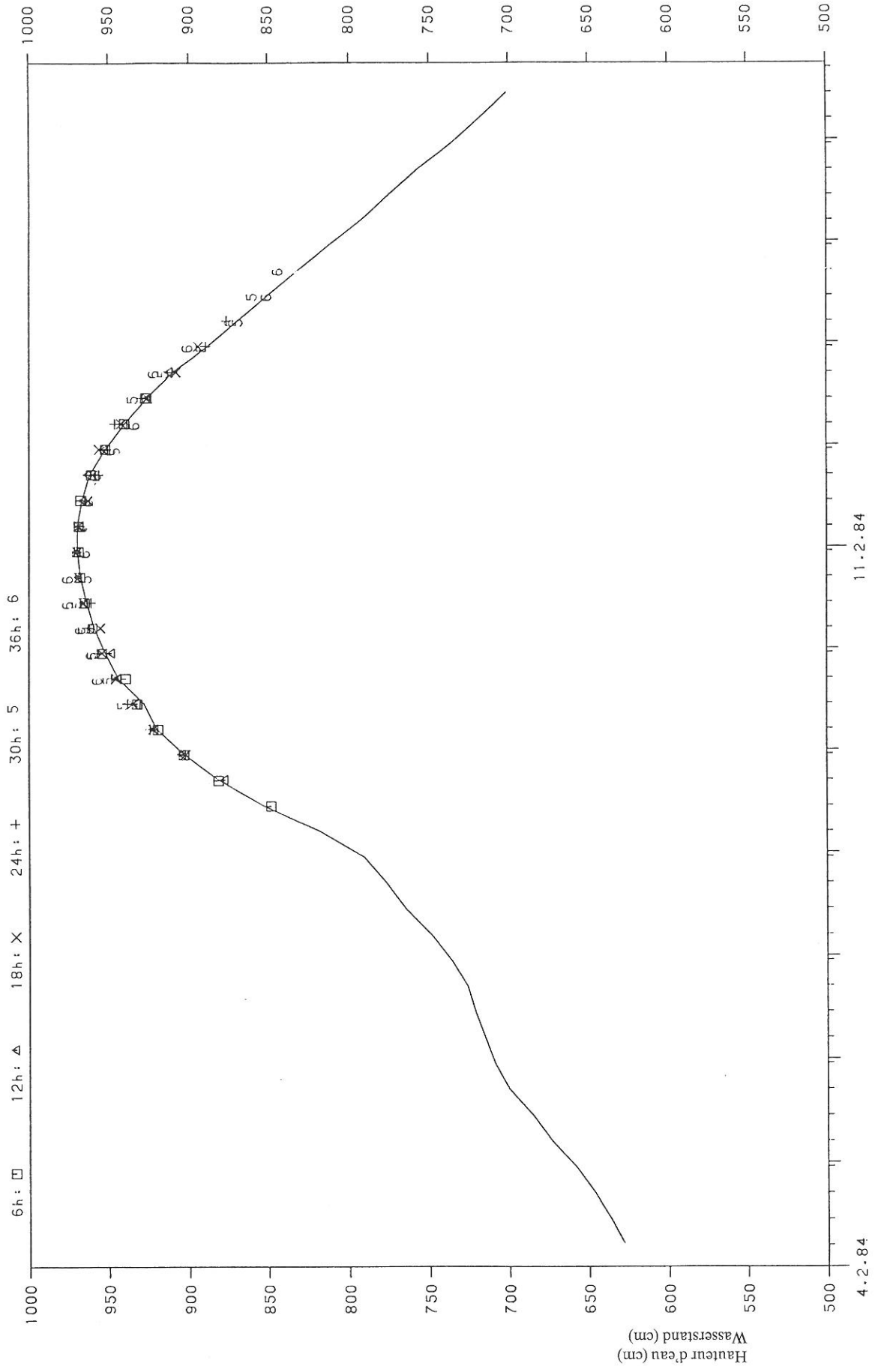


Fig. 5.5.3 Prévission effective des hauteurs d'eau à la station limnimétrique de Coblenz/Rhin

Abb. 5.5.3 Aktuelle Wasserstandsvorhersage am Pegel Koblenz/Rhein

29.5.83

22.5.83



11.2.84

4.2.84

Fig. 5.5.4 Prévision effective des hauteurs d'eau   la station limmim trique de Wessel/Rhein

Abb. 5.5.4 Aktuelle Wasserstandsvorhersage am Pegel Wessel/Rhein

La figure 5.5.3 représente des prévisions opérationnelles, pour la station limnimétrique de Coblenz, préparées à l'aide de filtres à canaux multiples dont les fonctions de transfert ont été calculées à partir des covariances pondérées, avec un accroissement de la variance de 5% (voir chapitre 5.5.1.2).

Pour l'échelle de Wesel, on a choisi la crue de février 1984, lors de laquelle des niveaux exceptionnels ont été atteints sur la Lahn et la Sieg, hors du domaine des tables niveau/débit pour les limnimètres d'entrée de Leun, Kalkofen et Menden (voir figure 5.5.1). Malgré ces conditions extrêmes, le modèle à canaux multiples de filtrage (MKF) eut l'occasion de faire ses preuves.

5.5.2.4 Utilisation des prévisions établies au moyen du modèle à canaux multiples de filtrage

En Allemagne fédérale, les annonces et prévisions de crues sont de la compétence des Länder. Divers services de l'Administration fédérale assistent cependant les Länder dans cette tâche, ainsi par exemple l'Autorité administrative des eaux et de la navigation. Pour le Rhin, c'est la Direction Sud-Ouest à Mayence et la Direction Ouest à Münster de cette même Autorité qui, conjointement avec l'IffH à Coblenz, assurent ce soutien, avec des plans détaillés et élaborés d'annonce de crue.

A l'IffH, on réalise actuellement des prévisions de crues effectives aux stations limnimétriques de Speyer, Mannheim, Worms, Mayence, Bingen, Kaub, Coblenz, Andernach, Bonn, Cologne, Düsseldorf, Ruhrort, Wesel, Rees et Emmerich. Ces prévisions sont retransmises, après accord avec les services des Länder fédéraux, par l'Autorité administrative de l'eau et de la navigation du Sud-Ouest (stations de Maxau jusqu'à Andernach) et par la Direction Ouest de cette même Autorité (stations de Bonn jusqu'à Emmerich) à la radiodiffusion et à la presse ainsi qu'à d'autres organes intéressés (mairie, police, services routiers, organisations de secours techniques, corps des sapeurs-pompiers, etc.).

Les Autorités administratives de l'eau et de la navigation ainsi que les services compétents des Länder fédéraux reçoivent en période de crues de 500 à 600 demandes téléphoniques par jour. Pour garantir des renseignements et alertes de crue plus sûres, en 1984/1985, on a introduit la publication obligatoire de trois prévisions par jour à intervalles de six heures – en coordination avec les trois termes journaliers des prévisions faites avec le modèle à canaux multiples de filtrage – dans la nouvelle prescription administrative concernant le service d'annonce des crues et débâcles, présentée par la WSD-Sud-Ouest en 1984, au lieu d'une prévision journalière aux stations limnimétriques sur le Rhin. Ces mesures expriment clairement l'expérience

Abbildung 5.5.3 zeigt operationelle Vorhersagen am Pegel Koblenz mit Mehrkanalfiltern, deren Übertragungsfunktionen aus gewichteten Kovarianzen bei 5% Varianzerhöhung (siehe Abschnitt 5.5.1.2) berechnet wurden.

Für den Pegel Wesel ist das Februarhochwasser 1984 ausgewählt worden, bei dem an Lahn und Sieg extreme Wasserstände außerhalb der Abflusstabelle auftraten (Eingangspegel Leun, Kalkofen und Menden, siehe Abbildung 5.5.1). Trotz dieser extremen Situation hat sich das Mehrkanalfiltermodell (MKF) bewährt.

5.5.2.4 Nutzung der mit dem Mehrkanalfiltermodell erstellten Vorhersagen

In der Bundesrepublik Deutschland sind für Hochwassermeldungen und -vorhersagen die Bundesländer zuständig. Bei der Durchführung ihres Hochwassermeldedienstes werden die Länder durch Bundesdienststellen (z.B. Wasser- und Schifffahrtsverwaltung) unterstützt. Beim Rhein erfolgt die Unterstützung durch die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung Südwest in Mainz und West in Münster anhand von detailliert ausgearbeiteten Hochwassermeldeplänen sowie durch die BfG in Koblenz.

In der BfG werden mit dem Mehrkanalfiltermodell z.Zt. aktuelle Hochwasservorhersagen an den Rheinpegeln Speyer, Mannheim, Worms, Mainz, Bingen, Kaub, Koblenz, Andernach, Bonn, Köln, Düsseldorf, Ruhrort, Wesel, Rees und Emmerich erstellt, die von den Wasser- und Schifffahrsdirektionen Südwest (Pegel Maxau bis Andernach) und West (Pegel Bonn bis Emmerich) nach Absprache mit den Landesdienststellen an Rundfunk, Presse sowie an andere interessierte Stellen (Bürgermeister, Polizei, Straßenverwaltungen, Technische Hilfswerke, Feuerwehren, usw.) weitergeleitet werden.

Bei den Wasser- und Schifffahrsdirektionen sowie den zuständigen Landesdienststellen gehen bei Hochwasser täglich 500 bis 600 telefonische Anfragen ein. Um gesicherte Auskünfte und Vorwarnungen geben zu können, ist in der 1984 von der WSD Südwest vorgelegten, überarbeiteten Eis- und Hochwassermeldedienst-Verwaltungsvorschrift 1984/1985 erstmals anstatt einer täglichen Wasserstandsvorhersage an Rheinpegeln ihres Zuständigkeitsbereichs – in Koordination mit den drei Vorhersagezeitpunkten des Mehrkanalfiltermodells – die Herausgabe von täglich drei Vorhersagen im zeitlichen Abstand von sechs Stunden verbindlich eingeführt worden. Hier kommt die in Zusammenarbeit mit der BfG seit 1980 gewonnene positive Erfahrung

positive gagnée depuis 1980, en coopération avec l'IfH, dans l'actualisation journalière des prévisions de crues.

5.5.3 La crue de février 1980

A titre d'exemple, on a inclus dans ce rapport une représentation des prévisions des hauteurs d'eau à la station limnimétrique de Coblenz (figure 5.5.5) et à celle de Dusseldorf (figure 5.5.6) lors de la crue de février 1980. Depuis 1983, on réalise les prévisions en utilisant d'autres paramètres encore dans le modèle (voir chapitre 5.5.1.2).

5.5.4 Application du modèle MKF aux bassins de la Moselle et de la Sarre

On pense employer le modèle MKF également pour la prévision des crues aux stations de Trèves et de Cochem, sur la Moselle. On a commencé à rassembler et préparer les données en 1988 et les premiers calculs de modèle sont prévus pour 1989. Il est envisagé d'établir des prévisions des hauteurs d'eau aux stations de Trèves et Cochem pour 6, 12, 18 et 24 heures à l'avance, basées sur des changements dans les hauteurs et les débits à intervalles de 6 heures aux stations françaises, luxembourgeoises et allemandes du bassin de la Moselle. Dans la phase opérationnelle, les prévisions quotidiennes des crues devront être actualisées à intervalles de 6 heures.

En 1988 ont commencé les travaux préparatoires pour une modélisation digitale détaillée de la surface du bassin de la Moselle. Dans un premier temps, ce modèle sera vérifié selon l'exemple de la Sûre. En cas de succès des tests, il est envisagé de l'employer pour la prévision des crues aux stations de Trèves et de Cochem, sur la Moselle.

Le modèle MKF doit également être appliqué à la prévision des crues à la station de Sarrebruck sur la Sarre. La collecte des données est à peu près achevée, de sorte que les calculs de modèle pourront commencer en 1989. On espère si possible atteindre 24 heures d'anticipation. Des prévisions à d'autres stations du cours inférieur de la Sarre seront utilisées pour les prévisions aux stations de la Moselle de Trèves et de Cochem.

bei der täglichen Aktualisierung der Hochwasservorhersagen zum Ausdruck.

5.5.3 Das Hochwasser vom Februar 1980

Als Beispiele sind Wasserstandsvorhersagen an den Pegeln Koblenz (Abbildung 5.5.5) und Düsseldorf (Abbildung 5.5.6) vom Februarhochwasser 1980 beigelegt. Seit 1983 wird mit anderen Modellparametern vorhergesagt (siehe Abschnitt 5.5.1.2).

5.5.4 Anwendung des MKF-Modells an das Mosel- und Saargebiet

Das MKF-Modell soll auch zur Hochwasservorhersage an den Moselpegeln Trier und Cochem angewandt werden. Mit der Datensammlung und der Datenaufbereitung wurde 1988 begonnen, die ersten Modellrechnungen sind für 1989 geplant. Auf der Basis von 6-stündlichen Wasserstands- bzw. Abflußänderungen an Pegeln aus dem französischen, luxemburgischen und deutschen Einzugsgebiet der Mosel sollen Wasserstände an den Pegeln Trier und Cochem für 6, 12, 18 und 24 Stunden vorhergesagt werden. Im operationellen Betrieb sollen Hochwasservorhersagen täglich im zeitlichen Abstand von 6 Stunden aktualisiert werden.

Im Jahre 1988 begannen die Vorarbeiten zur Erstellung eines flächendetaillierten digitalen Einzugsgebietmodells der Mosel, das zunächst am Beispiel der Sauer erprobt werden soll. Es ist geplant, dieses Modell nach erfolgreichen Eignungstests zur Hochwasservorhersage an den Moselpegeln Trier und Cochem einzusetzen.

Das MKF-Modell soll ebenfalls zur Hochwasservorhersage am Saarpegel Saarbrücken eingesetzt werden. Die Datensammlung ist nahezu abgeschlossen, so daß 1989 mit den Modellrechnungen begonnen werden kann. Angestrebt wird ein Vorhersagezeitraum von möglichst 24 Stunden. Vorhersagen an weiteren Pegeln am Unterlauf der Saar sollen bei den Vorhersagen an den Moselpegeln Trier und Cochem verwendet werden.

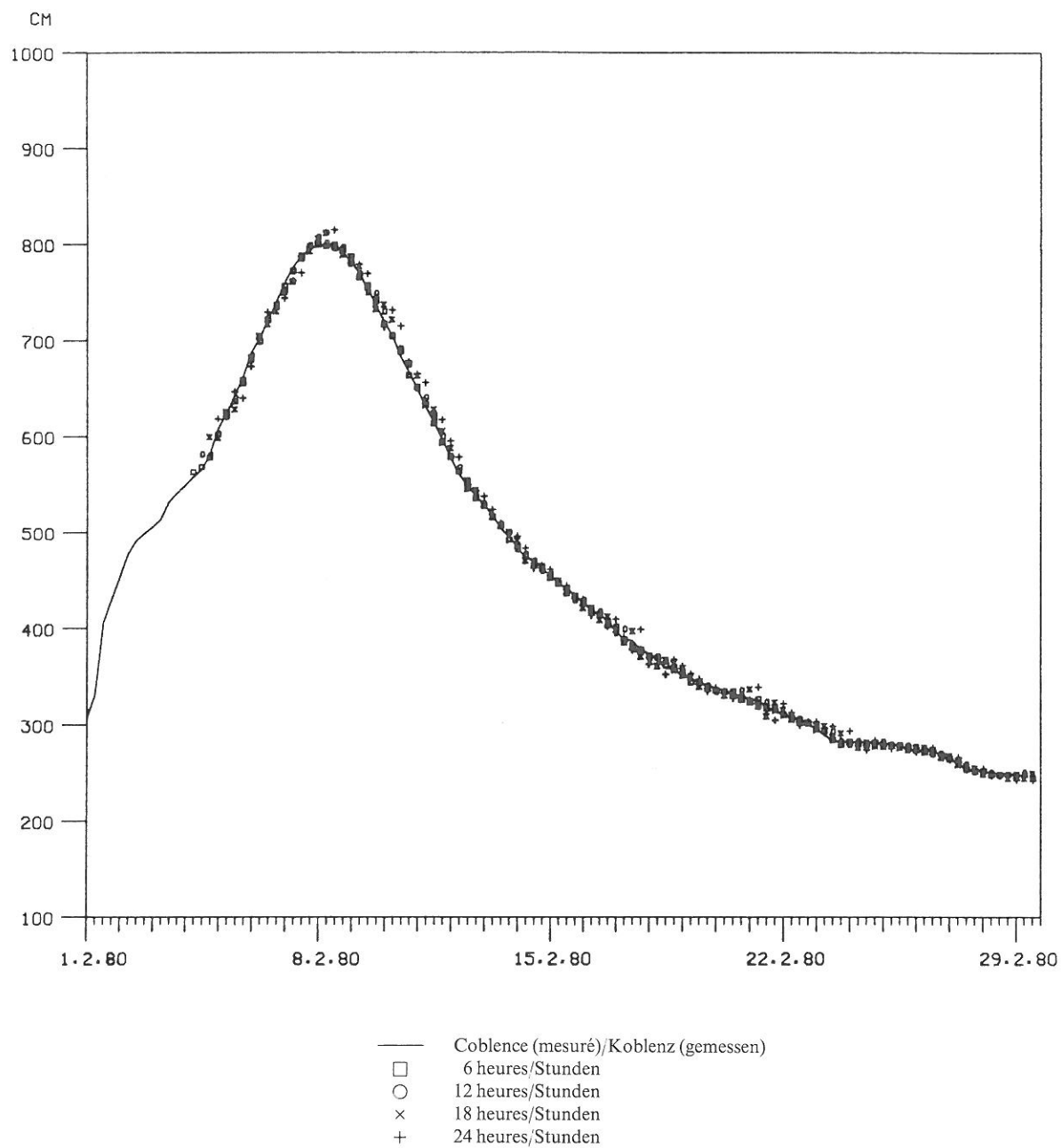


Fig. 5.5.5 Prédiction effective des hauteurs d'eau à la station limnimétrique de Coblenz/Rhin

Abb. 5.5.5 Aktuelle Wasserstandsvorhersage am Pegel Koblenz/Rhein

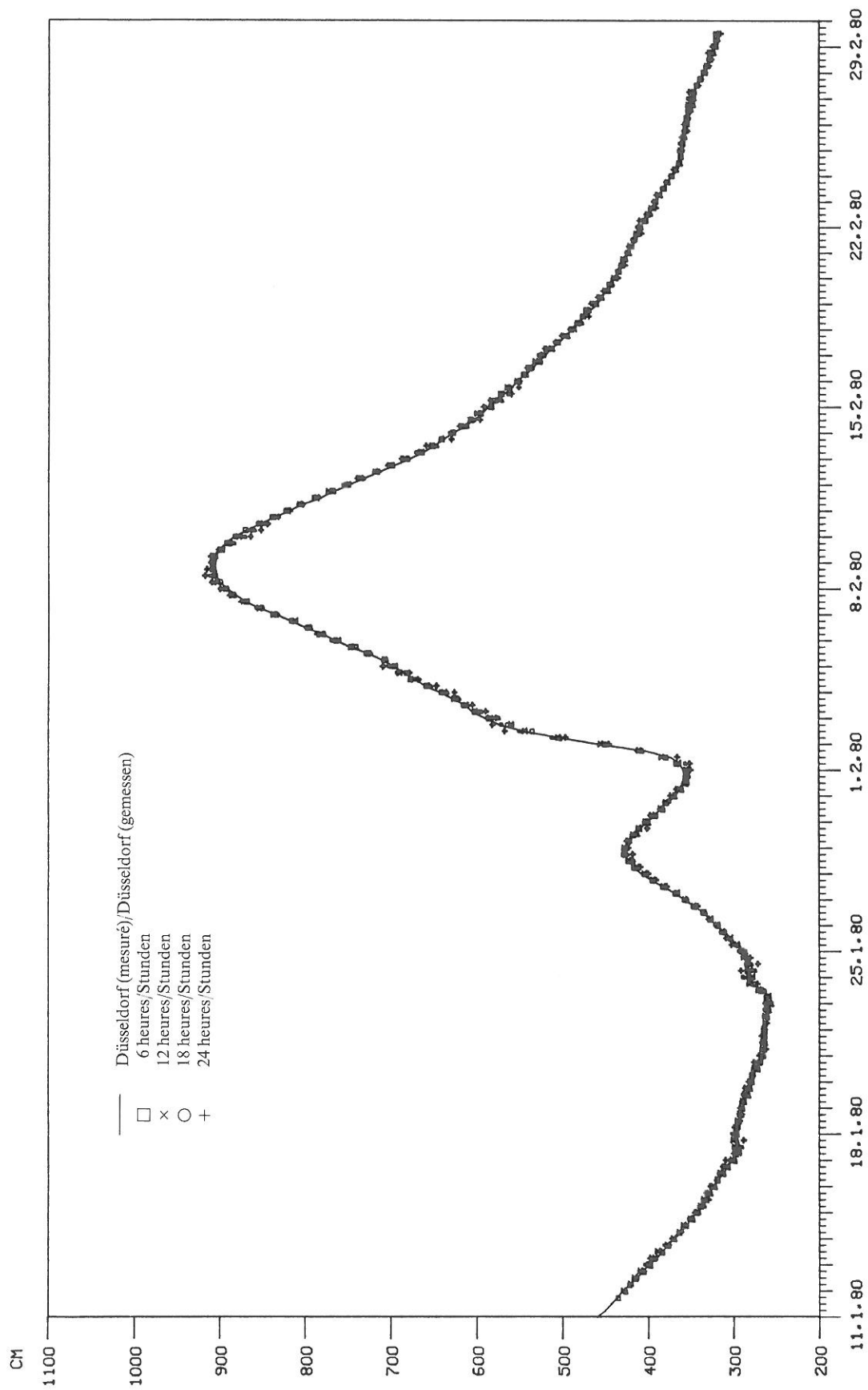


Abb. 5.5.6 6-Stündliche Wasserstandsvorhersagen

Fig. 5.5.6 Prévisions des hauteurs d'eau à intervalles de 6 heures

5.6 RHEINA

5.6.1 Prévision des débits pour les stations limnimétriques du Haut Rhin par l'Institut fédéral d'Hydrologie avec le modèle RHEINA, un modèle déterministe pluie-débit

5.6.1.1 Vue d'ensemble

A la suite des bons résultats obtenus avec les prévisions de hauteurs d'eau pratiquées par les Autorités administratives de l'eau et de la navigation depuis des dizaines d'années, on a mis au point à l'Institut fédéral d'Hydrologie (BfG), un modèle de prévision des débits pour les stations limnimétriques du Rhin supérieur. Il s'agit d'un modèle déterministe pluie-débit à discrétisation spatiale à couverture intégrale. Après la phase d'essai interne, la précision des prévisions va être améliorée avec la prise en compte d'autres paramètres réajustés et de nouvelles données d'entrée de calibrage et d'exploitation (par exemple d'autres prévisions hydrologiques en amont, des données hydromorphologiques améliorées et fonte de neige ainsi que par un affinement de la structure du modèle.

C'est en premier lieu la navigation qui bénéficie des prévisions (hautes-eaux et basses-eaux). En dehors de la protection usuelle des bâtiments et des installations dans la zone des crues, ces prévisions peuvent être également utilisées pour la défense contre les crues du Rhin supérieur (contrôle des pointes d'ondes de crue). En plus, il est possible de transmettre les prévisions vers aval (voir l'organigramme, figure 1.1).

On a commencé à développer le modèle RHEINA au début des années 1970. C'est pendant la période de crue d'octobre 1982 que les premières prévisions d'essai quasi-opérationnelles sont réalisées pour la station limnimétrique de Maxau/Rhin.

Des prévisions dans des conditions plus critiques encore suivent en décembre 1982 ainsi qu'en mai 1983. Les résultats d'un calcul réel de la crue de mai 1983 ainsi que ceux d'une révision de calculs antérieurs utilisant des paramètres de calibrage améliorés, des données de mesure sur les précipitations et les hauteurs d'eau à la station limnimétrique de Rheinfelden, sont représentés à la figure 5.6.1.

5.6.1.2 Le modèle RHEINA

5.6.1.2.a Les processus pluie-débit

Le calcul est exécuté conformément au tableau 5.6.1 selon l'ordre des processus pluie-débit individuels.

5.6 RHEINA

5.6.1 Abflußvorhersage der Bundesanstalt für Gewässerkunde für Pegel am Oberrhein nach dem deterministischen Niederschlag-Abfluß-Modell RHEINA

5.6.1.1 Überblick

Nach den bewährten und bereits seit Jahrzehnten praktizierten Wasserstandsvorhersagen der Wasser- und Schifffahrtsdirektionen wurde an der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) auch ein Modell zur Abflußvorhersage an Pegeln am Oberrhein entwickelt. Es handelt sich um ein räumlich gegliedertes, flächendeckendes, deterministisches Niederschlag-Abfluß-Modell. Nach der internen Testphase soll die Vorhersagegenauigkeit durch Einbeziehung weiterer Eich- und Betriebsdaten (z.B. weitere Oberliegervorhersagen, verbesserte hydromorphologische Daten und Schneeschmelzraten) sowie durch Verfeinerung der Modellstruktur erhöht werden.

Nutznieser der Vorhersage ist zunächst die Schifffahrt (Hoch- und Niedrigwasser). Neben den üblicherweise zu schützenden Objekten wie Gebäuden und Einrichtungen im Hochwasserbereich könnte diese Vorhersage in Zukunft auch für den Hochwasserschutz am Oberrhein (Steuerung der Wellenspitzen) eingesetzt werden. Ferner ist eine Weitergabe der Vorhersage an Unterlieger möglich (siehe Datenflußschema 1.1).

Die Entwicklung des Modells RHEINA begann Anfang der 70er Jahre. Erste quasi-operationelle Test-Vorhersagen wurden während des Hochwassers vom Oktober 1982 für den Pegel Maxau/Rhein durchgeführt.

Vorhersagen unter verschärften Bedingungen folgten im Dezember 1982 sowie im Mai 1983. Das Ergebnis der aktuellen Berechnung des Hochwassers vom Mai 1983 und einer späteren Nachrechnung mit verbesserten Eichparametern und gemessenen Niederschlägen und Wasserständen am Pegel Rheinfelden ist in Abbildung 5.6.1 dargestellt. Die Vorhersage RHEINA ist seit 1986 operationell.

5.6.1.2 Das Modell RHEINA

5.6.1.2.a Die Abflußprozesse

Die Berechnung wird entsprechend Tabelle 5.6.1 in der Reihenfolge der einzelnen Abflußprozesse vorgenommen.

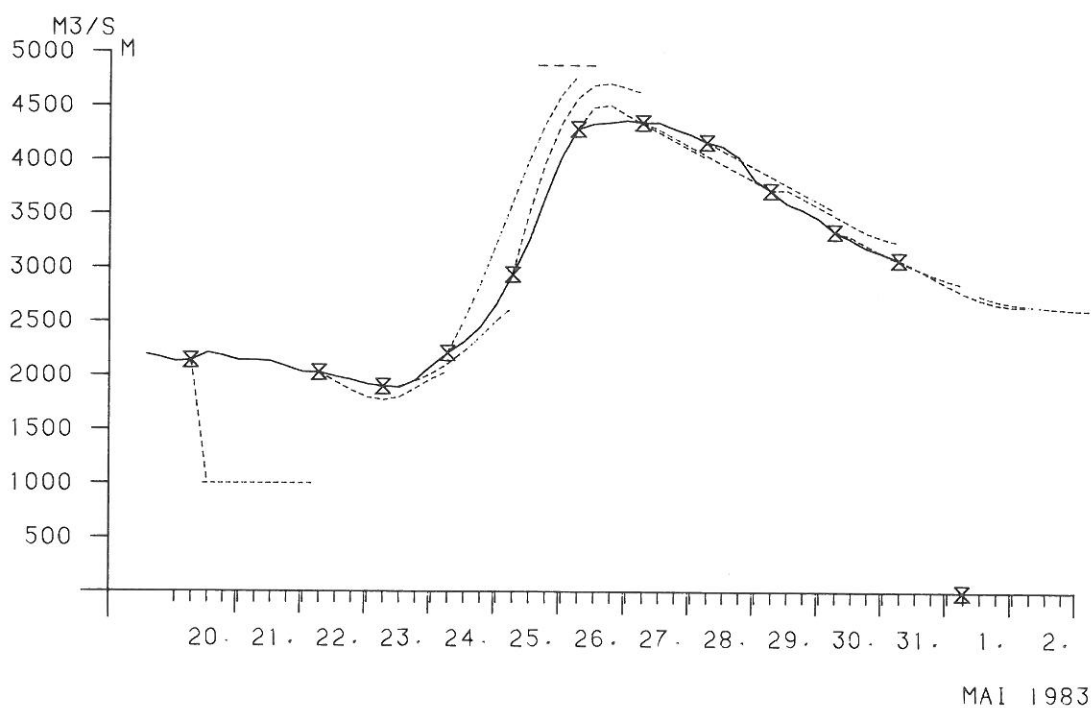
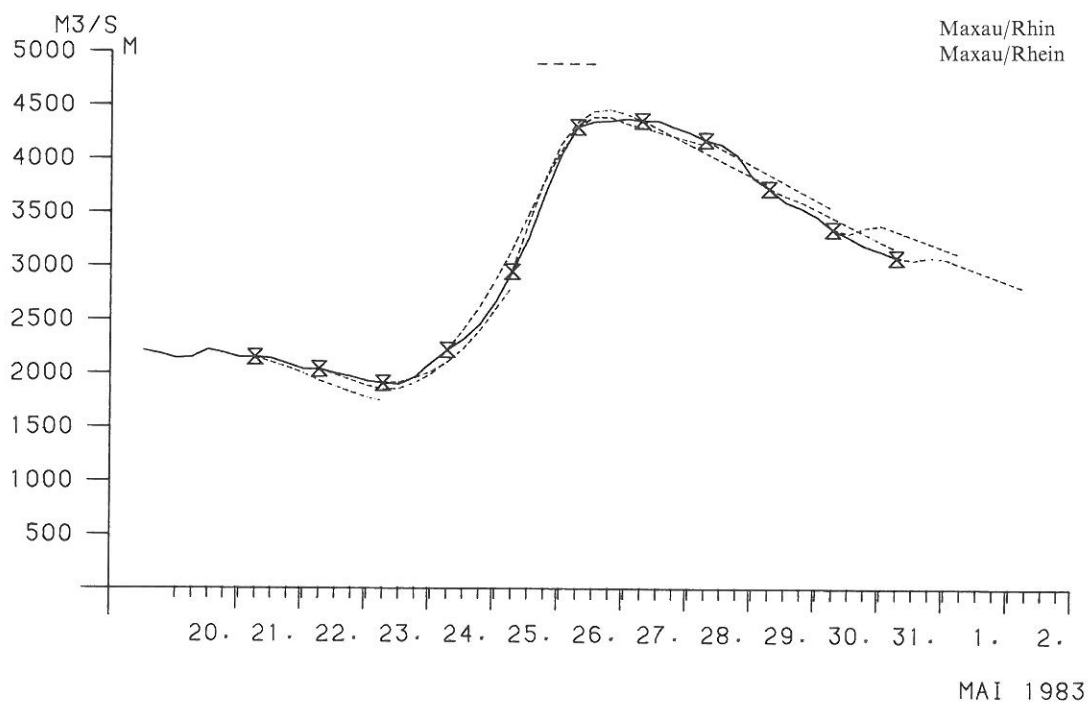


Fig. 5.6.1 Prévision du débit de crue de mai 1983 selon RHEINA
 En haut: prévision quasi-opérationnelle avec des données effectives et des prévisions de précipitations (modèle BKF) et de débits pour la station de Rheinfelden (prévision d'amont)
 En bas: vérification du calcul avec des valeurs mesurées aux mêmes stations et points

Abb. 5.6.1 Abflußvorhersage des Hochwassers vom Mai 1983 nach RHEINA
 Oben: quasi-operationell mit aktuell erfaßten Betriebsdaten und vorhergesagten Niederschlägen (BKF-Modell) und Abflüssen am Pegel Rheinfelden (Oberliegervorhersage)
 Unten: Nachrechnung mit Meßwerten an denselben Stationen bzw. Punkten

Processus/Prozeß	Méthode de calcul/Rechenmethode
Constitution des charges/ Belastungsbildung	Calcul de la précipitation régionale, p.ex. en utilisant la méthode des quadrants ou des polygones/ Gebietsniederschlagsberechnung, z.B. Quadranten- oder Polygonmethode
Processus pluie-débit/ Abflußbildung	Variante coaxiale des précipitations antécédentes, optimisation/ Vorregen-Koaxial-Variante, Optimierung
Concentration des débits/ Abflußkonzentration	Transfert par hydrogramme unitaire, optimisation/ Übertragung mittels Einheitsganglinie, Optimierung
Déformation des ondes de crue (transformation)/ Abflußverformung (Transformation)	Calcul de la progression des ondes par: a) un transfert hydrologique (p.ex. Muskingum) et b) une chaîne de réservoirs [Commission de l'Etude des Crues, 1978]/ Wellenablaufberechnung mittels: a) einer hydrologischen Übertragung (z.B. Muskingum) und b) einer hydrologischen Speicherkette [Hochwasserstudienkommission, 1978]

Tableau 5.6.1: Méthodes de calcul utilisées dans le modèle RHEINA pour déterminer les processus pluie-débit

Tabelle 5.6.1: Im Modell RHEINA benutzte Methoden zur Berechnung des Niederschlag-Abfluß-Prozesses

5.6.1.2.b Subdivision du bassin hydrographique en vue du calcul numérique

Le calcul des débits dans un bassin hydrographique s'effectue en principe dans la direction aval, de la source jusque vers la proximité de l'embouchure du premier affluent pour lequel tous les processus pluie-débit compris dans le tableau 5.6.1 sont pris en considération. On ne devrait s'écarter de ce principe que dans le cas où il y aurait une prévision d'entrée en amont.

Sur cette base, le Rhin est subdivisé en 8 sections principales jusqu'à la station limnimétrique d'Andernach (figure 5.6.2); à l'extrémité de chaque section, le résultat intermédiaire, mis en mémoire, est tenu prêt à être admis dans la section principale suivante. Pour la station N=300 Rheinfelden, on dispose d'une prévision d'entrée, préparée par le SHGN/Berne, qui permet d'éviter d'inclure la zone en amont de N=300 dans les calculs (voir chapitre 5.1).

5.6.1.2.c Programme de calcul

Le programme de calcul est bien explicité par l'organigramme (fig. 5.6.3). Celui-ci est subdivisé verticalement en programmes et en fichiers; ceux-ci sont eux-mêmes subdivisés en fichiers internes et en fichiers périphériques externes.

Un fichier interne est constitué pendant un calcul de prévision à l'aide d'un programme ou de plusieurs programmes et sera relu plus tard par d'autres programmes. Dans trois cas (marqués par des barres), on

5.6.1.2.b Die rechentechnische Aufgliederung des Einzugsgebietes

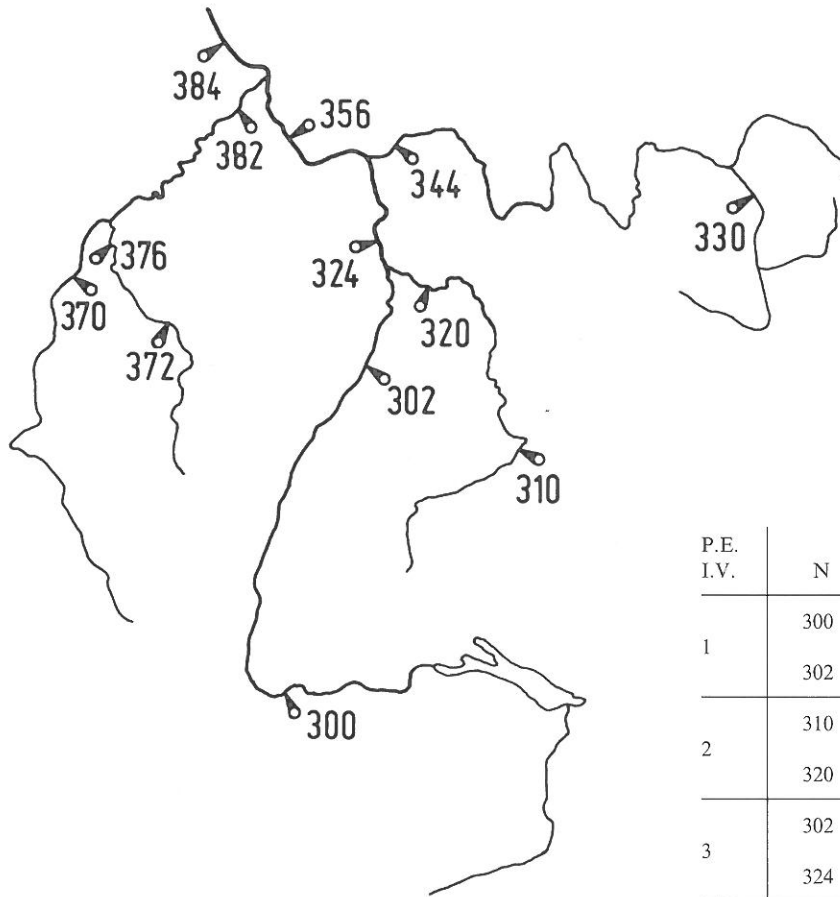
Die Abflußberechnung in einem Einzugsgebiet erfolgt grundsätzlich von der Quelle flußabwärts bis zur Einmündung des ersten Nebenflusses, an dem alle in Tabelle 5.6.1 aufgeführten Niederschlag-Abfluß-Prozesse berücksichtigt werden. Von diesem Prinzip wird nur dann abgewichen, wenn eine Oberliegervorhersage vorliegt.

Der Rhein ist damit bis zum Pegel Andernach in 8 Hauptabschnitte unterteilt (Abb. 5.6.2) an deren Ende jeweils das Zwischenergebnis der Abflußberechnung abgespeichert und für die Aufnahme im folgenden Hauptabschnitt bereitgehalten wird. Für die Station mit N=300 (Pegel Rheinfelden) liegt eine schweizer Oberliegervorhersage der Landeshydrologie und -geologie (LHG) in Bern vor, so daß das Gebiet oberhalb N=300 nicht zu bearbeiten ist (siehe Abschnitt 5.1).

5.6.1.2.c Das Rechenprogramm

Das Rechenprogramm läßt sich anhand des Flußdiagramms (Abb. 5.6.3) erläutern. Dieses ist vertikal gegliedert in Programme und Dateien, letztere in interne und periphere (externe) Dateien.

Eine interne Datei wird während einer Vorhersageberechnung von einem oder mehreren Programmen erstellt und später von anderen Programmen gelesen. In drei Fällen (mit Balken gekennzeichnet) wird eine in-



P.E. I.V.	N	Station/Pegel
1	300	Rheinfelden
	302	Maxau
2	310	Wendlingen (K.)
	320	Heidelberg
3	302	Maxau
	324	Worms
4	330	Pettstadt
	344	Raunheim
5	324	Worms
	356	Kaub
6	372	Güdingen
	376	Kanzem
7	370	Perl
	382	Alken
8	356	Kaub
	384	Andernach

Fig. 5.6.2 Subdivision calculée du bassin du Rhin à partir de la station Rheinfelden (N=300) jusqu'à Andernach (N=384) en 8 tronçons principaux (P.E. = 1,..., 8)

Abb. 5.6.2 Rechentechnische Einteilung des Rheingebietes von den Pegeln Rheinfelden (N=300) bis Andernach (N=384) in 8 Hauptabschnitte (I.V. = 1,..., 8)

complète un fichier interne lors du calcul de prévision. On les désigne à la figure 5.6.3 par ID (fichier interne durable ou permanent) et IT (fichier interne temporaire).

Un fichier périphérique est préparé avant le calcul. Il contient des données de calibrage, des séquences numériques et des noms qui ne sont que lus lors du calcul de prévision. Sur la figure 5.6.3 on utilise la désignation P pour le fichier périphérique.

L'organigramme lui-même est disposé horizontalement. La première partie traite l'exécution du programme (RHPARA), la lecture des hauteurs d'eau et des débits (LESQME), la lecture des précipitations ponctuelles (LESNIE), le calcul des précipitations régionales (GEBNIE), ainsi que la lecture des précipitations aux noeuds de la grille prévues (LESGNV). La deuxième partie représente le programme de calcul véritable. Il y a un passage de programme pour chaque section principale de la rivière (indice de passage: IV). Le segment EINHGL (hydrogramme unitaire) calcule les coefficients d'écoulement ainsi que les débits des petits bassins fluviaux (bassins EINHGL) selon la méthode de l'hydrogramme unitaire. Une différenciation doit être faite entre les »bassins modèles« avec le nombre $NPEG < 100$, pour lesquelles il y a des données effectives sur les hauteurs d'eau, et les »bassins de simulation« avec $100 < NPEG < 200$, pour lesquelles on ne dispose pas de données effectives. Le segment KOMBIN couvre les surfaces et transforme le débit des sections secondaires des bassins EINHGL (bassins hydrographiques dont les débits sont calculés d'après le système de l'hydrogramme unitaire) jusqu'aux sections principales.

Le segment INPVOR sert à l'introduction des prévisions d'entrée en amont par lecture pour chaque section principale (P.E. = 1, 2, ...) et pour chaque section secondaire.

Le segment TRANBB calcule le débit dans les sections principales. Le modèle a été développé par la Commission d'étude des crues du Rhin [CECR, 1978].

5.6.1.2.d Commande de paramètres

Le programme principal RHPARA dirige le déroulement du calcul au moyen de paramètres dits »de commande«, tirés du fichier périphérique DPARAM72.

Ces paramètres commandent par exemple:

- prévisions d'entrée
- format d'impression
- fichiers
- l'intervalle de temps (6 ou bien 3 heures)
- appel de sous-programme
- type de données (niveau ou débit)
- méthodes d'optimisation

terne Datei bei der Vorhersageberechnung ergänzt. In Abbildung 5.6.3 stehen hierfür die Bezeichnungen ID (interne Dauerdatei) und IT (interne Temporärdatei).

Eine periphere Datei wird vor dem Rechenlauf erstellt. Sie enthält Eichdaten, Nummernfolgen und Namen, die während der Vorhersageberechnung nur gelesen werden. In Abbildung 5.6.3 steht hierfür die Bezeichnung P.

Das Flußdiagramm selbst ist horizontal gegliedert. Im ersten Teil werden die Programmsteuerung (RHPARA), das Lesen der Wasserstands- oder Abflußdaten (LESQME), das Lesen der Punktniederschlagsdaten (LESNIE), das Berechnen der Gebietsniederschläge (GEBNIE) sowie das Lesen der vorhergesagten Rasterpunktniederschläge (LESGNV) vorgenommen. Der zweite Teil stellt das eigentliche Rechenprogramm dar. Es wird für jeden Hauptabschnitt, also IVP mal (Laufindex IV) durchlaufen. EINHGL berechnet die Abflußbeiwerte und die Abflüsse der kleinen Einzugsgebiete (EINHGL-Gebiete) nach dem Einheitsganglinienverfahren. Dabei ist zu unterscheiden zwischen »Modellgebieten« mit Nummer $NPEG < 100$, für die aktuelle Wasserstandsdaten zur Verfügung stehen und »Simulationsgebieten« mit $100 < NPEG < 200$, für die aktuelle Wasserstandsdaten nicht zur Verfügung stehen. In KOMBIN erfolgt die Flächendeckung und die Transformation des Abflusses in Nebenabschnitten von den EINHGL-Gebieten bis zu den Hauptabschnitten.

In INPVOR lassen sich Oberlieger (Input)-Vorhersagen für jeden Hauptabschnitt (I.V. = 1, 2, ...) und für jeden Nebenabschnitt einlesen.

TRANBB berechnet den Abfluß in den Hauptabschnitten. Dieses Modell hat die Internationale Hochwasserstudienkommission für den Rhein entwickelt [HWSK, 1978].

5.6.1.2.d Parametersteuerung

Das Hauptprogramm RHPARA steuert den Rechenablauf über sog. Steuerparameter, die aus der peripheren Datei DPARAM72 übernommen werden.

Diese Parameter entscheiden z.B. über:

- Inputvorhersagen
- Ausdruckumfang
- Dateiumfang
- Zeitintervall (6 bzw. 3 Std.)
- Unterprogrammaufruf
- Datenart (Wasserstands- bzw. Abflußdaten)
- Optimierungsmethoden

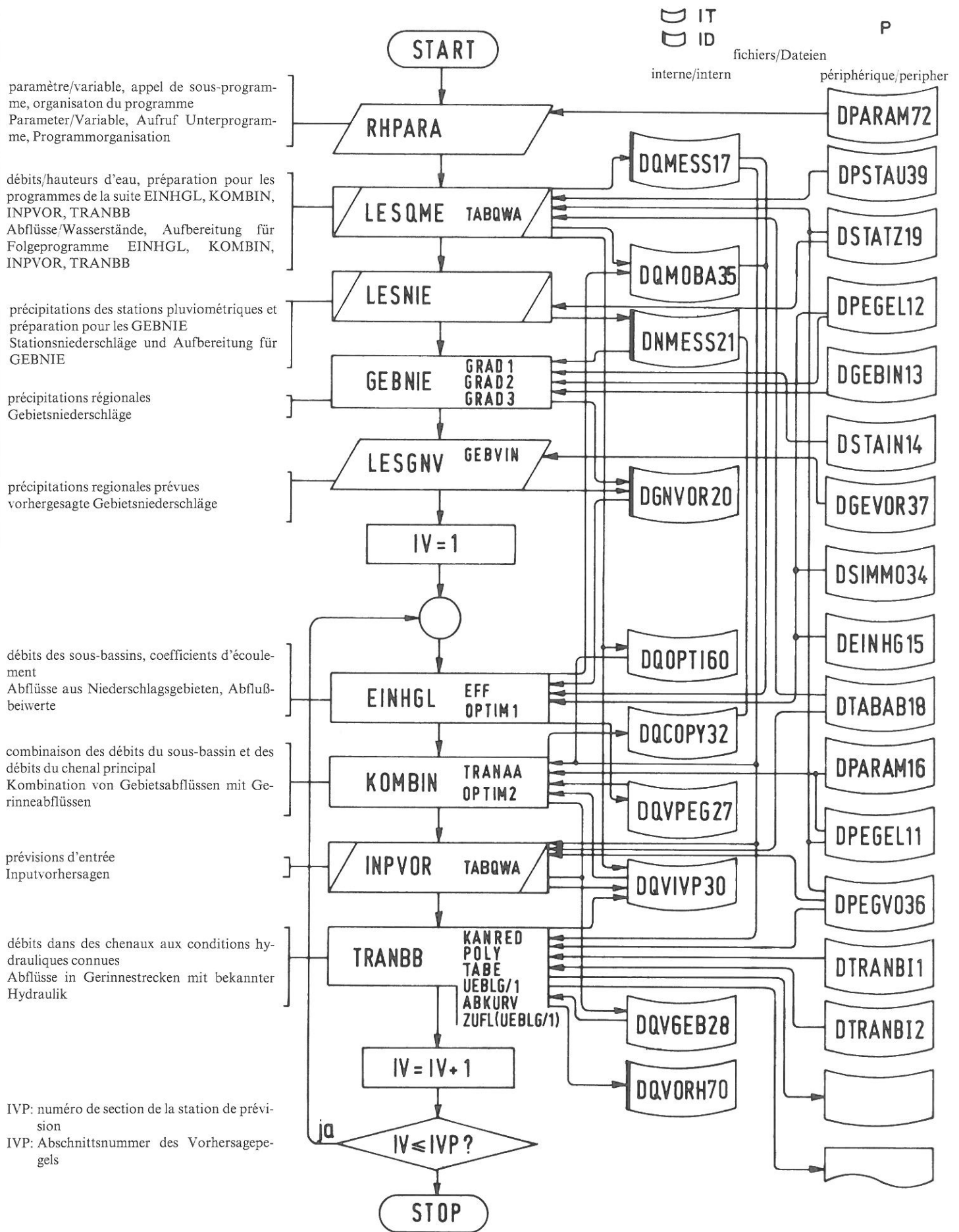


Fig. 5.6.3 Organigramme RHEINA

Abb. 5.6.3 Flußdiagramm RHEINA

5.6.1.3 Données

5.6.1.3.a Le réseau de stations pour l'obtention des données effectives

Le réseau des stations pour les données effectives se compose exclusivement de stations pluviométriques et limnimétriques. Le cas spécial de l'eau de fonte de neige n'est pas discuté ici; à l'heure actuelle, on utilise à cette fin des valeurs d'estimation de l'équivalent en eau de la couche de neige à Freiburg, Freudenstadt et Stuttgart.

La figure 5.6.4 montre la situation des stations utilisées. Celles-ci sont réunies dans le tableau 5.6.2, selon le mode de transmission et le type de frais de service annuels.

5.6.1.3.b Données de calibrage et paramètres du modèle

Tous les modèles mathématiques calculant des débits comprennent de telles grandeurs numériques qui restent constantes ou ne changent que peu pendant la progression d'une onde de crue. Ces grandeurs s'appellent »paramètres du modèle«. Quand on détermine ces paramètres, on utilise des expressions synonymes telles que »calibrage des paramètres«, »calibrage du modèle«, parfois adaptation du modèle, »poursuite des paramètres« ou évaluation des paramètres.

Les paramètres de calibrage dans les sous-modèles RHEINA dénommés GEBNIE, EINHGL, KOMBIN, TRANAA et TRANBB – les seuls à comprendre des paramètres – sont calibrés par optimisation selon la méthode des moindres carrés à l'aide de séries de données d'ondes de crue (historiques). Le coefficient d'écoulement, le débit de base et les constantes dans les fonctions de transfert dépendent par exemple d'événements de crue individuels. La plupart des autres paramètres par contre ne sont pas variables.

Les paramètres de calibrage apparaissent dans l'organigramme (fig. 5.6.3), à la colonne des fichiers périphériques. Ces paramètres sont:

- les paramètres caractérisant le réseau de stations et délimitant les sous-bassins (coordonnés de Gauss-Krüger)
- les paramètres des courbes des débits cumulés moyens, des hydrogrammes unitaires et d'autres fonctions de transfert
- les paramètres de certains classements p.ex. stations, régions, tronçons de rivière.

5.6.1.3 Daten

5.6.1.3.a Das Stationsnetz für aktuelle Daten

Das Stationsnetz für aktuelle Daten enthält ausschließlich Niederschlags- und Pegelstationen. Der Sonderfall von Schneeschmelzabflüssen wird hier nicht besprochen, hierfür werden gegenwärtig Schätzwerte des Wasseräquivalents der Schneedecke in Freiburg, Freudenstadt und Stuttgart benutzt.

Aus Abbildung 5.6.4 ist die Lage der benutzten Stationen ersichtlich, sie sind in Tabelle 5.6.2 nach Art der Datenübertragung und der Kostenquelle zusammengestellt.

5.6.1.3.b Eichdaten und Modellparameter

Alle mathematischen Modelle zur Abflußberechnung enthalten numerische Größen, die im Verlauf einer Hochwasserwelle entweder konstant bleiben oder sich nur geringfügig ändern. Diese Größen nennt man »Modellparameter«. Für die Quantifizierung dieser Parameter benutzt man synonym die Bezeichnungen Parametereichung, Modelleichung, gelegentlich auch Modellanpassung, Parameternachführung oder Parameterabschätzung.

Die Eichparameter in den Teilmodellen GEBNIE, EINHGL, KOMBIN, TRANAA und TRANBB – nur in diesen sind Parameter enthalten – lassen sich entweder aus Erfahrung angeben oder sie werden durch Optimierung nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Hierzu dienen Datensätze von historischen Hochwasserwellen. Vom einzelnen Hochwassereignis bedingt abhängige Parameter sind z.B. der Abflußbeiwert, der Basisabfluß und Konstanten in Übertragungsfunktionen. Die meisten übrigen Parameter sind dagegen nicht veränderlich.

Eichparameter tauchen im Flußdiagramm (Abb. 5.6.3) in der Spalte der peripheren Dateien auf. Hierzu zählen die Parameter,

- die das Stationsnetz und die Teileinzugsgebiete kennzeichnen bzw. abgrenzen (Gauss-Krüger Koordinaten),
- die die mittleren Summenkurven, Einheitsganglinien und andere Übertragungsfunktionen quantifizieren und
- die bestimmte Zuordnungen bewirken, z.B. Stationen, Gebiete und Flußabschnitte.

Stations de mesure/Pegel

- | | | |
|---|-----------|-----------------------------|
| Stations de mesure aux bassins N-A | ○ 1-99 | Pegel an N-A-Gebieten |
| Stations de mesure aux petites sections du fleuve | ○ | Pegel an kl. Flußstrecken |
| Stations de mesure aux grandes sections du fleuve | ○ > = 300 | Pegel an gr. Flußstrecken |
| Stations de mesure Allgomatic en service | ○ (+) | Allgomatic-Pegel in Betrieb |
| Stations de mesure Allgomatic prévue | ○ (-) | Allgomatic-Pegel geplant |

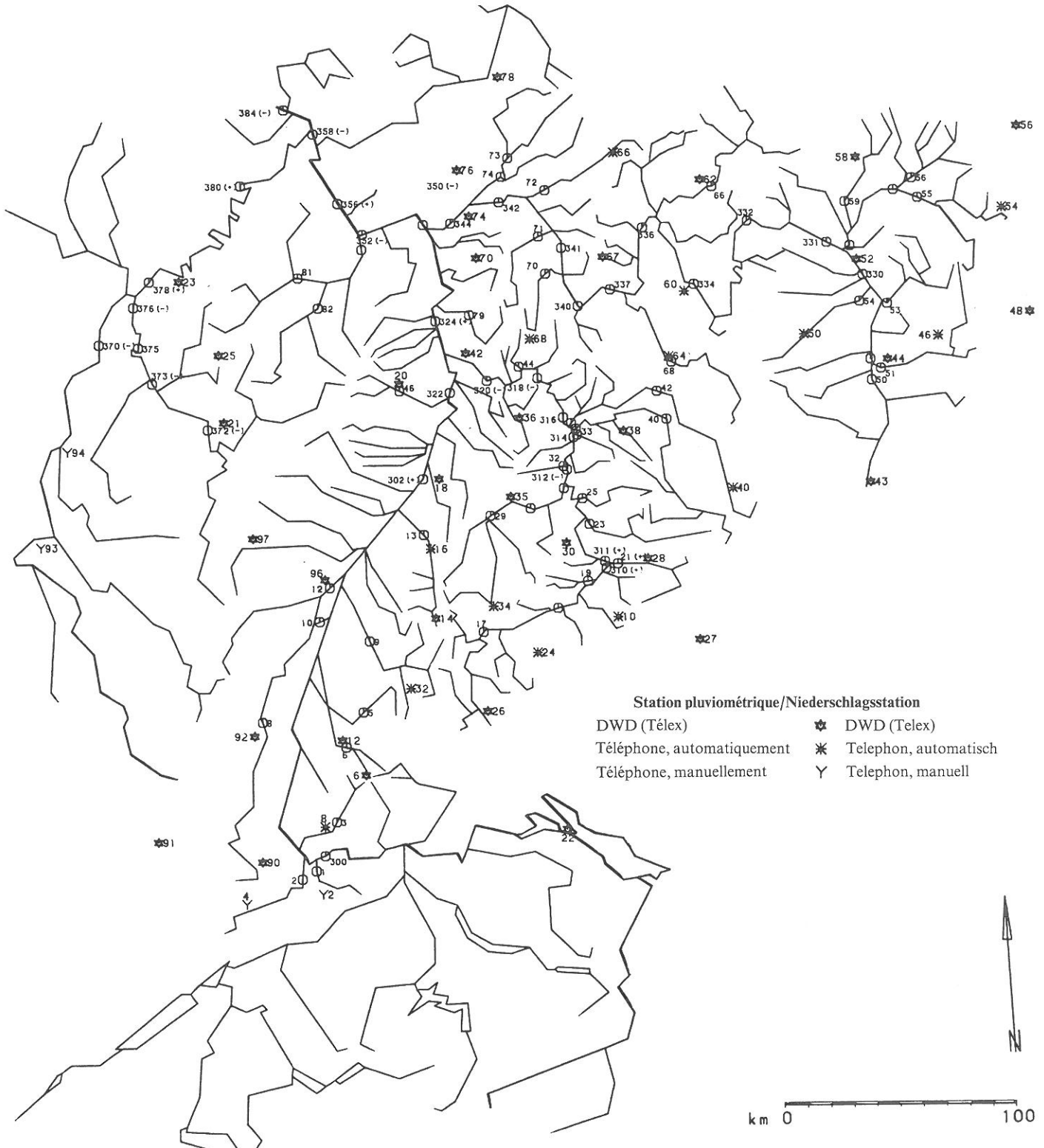


Fig. 5.6.4 Stations de mesure utilisées pour la prévision opérationnelle RHEINA

Abb. 5.6.4 Für die operationelle RHEINA-Vorhersage benutzte Meßstationen

Tableau 5.6.2: Données d'exploitation du modèle RHEINA

Station + genre de donnée	Nombre	Transmission des données	Frais
Hauteurs d'eau			
limnigraphes en Suisse	3	répondeur d'appel	téléphone
limnigraphes en France	1	répondeur d'appel (Colmar/III)	téléphone
	1	observateur de station (Strasbourg/III)	téléphone
	1	Gerstheim/Canal de décharge de l'III (par EDF/ Kembs ou par barrage agricole Kehl)	téléphone
limnigraphes en R.F.A.	17	répondeur d'appel	téléphone
(dans des Länder fédéraux allemands)	1	observateur de station (Neustadt/Speyerbach)	téléphone
	3	télécommunication automatique (poste)	téléphone
limnigraphes de la WSV (l'Autorité administrative de l'eau et de la navigation)	2	installation téléphonique de télécommunication (WSV)	--
	1	téléphone, écluse de Heidelberg	--
Précipitations			
stations pluviométriques en Suisse	2	observateur de station	téléphone, rémunération de l'observateur
stations pluviométriques en France, DWD (Service Météorologique Allemand)	33	télex, DWD-Offenbach	télex
IfH (l'Institut fédéral d'Hydrologie)	13	installation téléphonique de télécommunication (poste)	frais d'entretien
Données de prévision			
Valeurs de précipitation pour dix points de la grille et 48 heures		télex, (Service Météorologique Allemand, DWD-Offenbach)	frais d'abonnement
Valeurs de débit calculées pour le limnigraphe de Rheinfelden, 48 heures		télex, Zürich/Berne	frais d'abonnement

Tab. 5.6.2 RHEINA-Betriebsdaten

Meßstelle bzw. Datenart	Anzahl	Datenübertragung	Kostenquelle
Wasserstände			
Pegel Schweiz	3	Anrufbeantworter	Telefon
Pegel Frankreich	1	Anrufbeantworter (Colmar/III)	Telefon
	1	Stationsbeobachter (Straßburg, III)	Telefon
	1	Gerstheim/III Entlastungskanal (über EdF/Kembs oder Kulturwehr Kehl)	Telefon
Pegel Bundesländer	17	Anrufbeantworter	Telefon
	1	Stationsbeobachter (Neustadt/Speyerbach)	Telefon
	3	Telefon, automatisch fernmeldend (Post)	Telefon
Pegel der Wasser- und Schifffahrts- verwaltung (WSV)	2	fernmeldend	--
	1	Telefon, Schleuse Heidelberg	--
Niederschläge			
Meßstation Schweiz	2	Stationsbeobachter	Telefon, Betreuervergütung
Meßstation Frankreich, Deutscher Wetterdienst (DWD)	33	Telex, DWD Offenbach	Telex
BfG	13	Telefon, automatisch fernmeldend (Post)	Telefon, Wartungsvertrag
Vorhergesagte Daten			
Niederschlagsvorhersage für 10 Rasterpunkte und 48 Stunden		Telex (DWD Offenbach)	Telex, Vertragskosten
Wasserstandsvorhersage für den Pegel Rheinfelden, 48 Stunden		Telex (LHG Bern)	Vertragskosten

5.6.1.3.c Données d'exploitation

La prévision opérationnelle s'appuie sur les données d'exploitation de 78 stations hydrométriques qui sont réunies dans le tableau 5.6.2, soit 30 limnigraphes donnant les niveaux à 13 et 19 heures du jour précédent, ainsi qu'à 1 et 7 heures TEC, 48 stations pluviométriques donnant des totaux pour six heures, soit de 7 à 13 heures, de 13 à 19 heures, de 19 heures (jour précédent) à 1 heure et 1 heure à 7 heures, ainsi que dix noeuds du réseau avec les prévisions de précipitations pour les mêmes intervalles.

Les débits prévus (prévision d'entrée en amont) comme les débits réels, sont introduits dans le système selon le même horaire.

Pour la transmission par télex et téléphone, les quatre appareils mentionnés dans le chapitre 5.6.1.4 sont disponibles au centre de prévision.

Toutes les données sont introduites au clavier d'un terminal, l'écran disposant d'un masque. Leur plausibilité est vérifiée par un hydrologue expérimenté aussi bien que par contrôles internes de routine.

5.6.1.4 La prévision opérationnelle

Au centre de prévision de l'IfH les appareils et le matériel disponible sont:

- a. téléphone PTT avec sélection automatique
- b. téléphone de l'Autorité administrative de l'eau et de la navigation (WSV), par lequel on peut joindre tous les services et toutes les stations limnimétriques de la WSV
- c. un terminal à écran de visualisation, ayant communication avec l'ordinateur SIEMENS de la WSV à Karlsruhe
- d. un centre OTT Allgomatic connecté au réseau PTT et au téléphone de la WSV, avec un Modem pour les appels automatiques des stations limnimétriques des Länder fédéraux, comme de la WSV et des stations pluviométriques
- e. un appareil transcripteur de cartes météorologiques, de la firme HELL, recevant l'émetteur d'ondes longues du Service Météorologique Allemand (DWD) et
- f. une station récepteur METEOSAT (à partir de 1988).

Selon une routine, une personne compétente (à mi-temps; à plein temps en période de crue) s'occupe de l'organisation des données (surveillance des stations hydrométriques, saisie et digitalisation des données). En cas de crue, il y a deux autres collaborateurs qui sont au courant de l'organisation des données. La coordination dépend de l'auteur du modèle).

5.6.1.3.c Betriebsdaten

Zur operationellen Vorhersage stehen die Betriebsdaten der in Tabelle 5.6.2 zusammengestellten 78 Meßstationen zur Verfügung. Im einzelnen sind dies 30 Pegel mit Wasserständen zu den Zeitpunkten 13.00, 19.00 (je Vortag), 01.00 und 07.00 Uhr MEZ, 48 Niederschlagsstationen mit 6-Std.-Summen 07.00-13.00, 13.00-19.00, 19.00 (je Vortag)-01.00 und 01.00-07.00 Uhr sowie 10 Rasterpunkte mit Niederschlagsvorhersagen für die analogen Zeitintervalle.

Die vorhergesagten Abflüsse (Oberliegervorhersagen) werden ebenso wie die gemessenen Abflüsse zu den analogen Zeitpunkten eingegeben.

Zur Telex- und Telefonübertragung stehen in der Vorhersagezentrale die in Abschnitt 5.6.1.4 genannten Geräte zur Verfügung.

Alle Daten werden manuell erfaßt und über ein Bildschirm-Terminal (Maske) eingegeben. Ihre Prüfung auf Plausibilität erfolgt sowohl durch den erfahrenen Hydrologen als auch modellintern durch Prüfroutinen.

5.6.1.4 Die operationelle Vorhersage

Die Vorhersagezentrale der BfG enthält insbesondere folgende Geräte und Unterlagen:

- a. ein Posttelefon mit automatischer Wähleinrichtung
- b. ein WSV-Telefon, über das alle Dienststellen und Pegel der WSV erreichbar sind
- c. ein Bildschirm-Terminal mit Anschluß an den SIEMENS-Rechner der WSV in Karlsruhe
- d. eine an das Post- und das WSV-Telefon angeschlossene OTT-Zentralstation Allgomatic mit Modem zum automatischen Telefonabruf von Länderpegeln, WSV-Pegeln und Niederschlagsstationen
- e. einen Wetterkartenschreiber der Firma HELL zum Empfang des DWD-Longwellenprogramms und
- f. eine METEOSAT-Empfangsstation (ab 1988).

Die Sachbearbeiterin führt routinemäßig täglich halbtags und bei Hochwasser ganztags die Datenorganisation (Überwachung der Meßstationen, Erfassung und Digitalisierung der Daten) durch. Für den Hochwasserfall sind zwei weitere Mitarbeiter mit der Datenorganisation vertraut. Die Koordination liegt beim Modellbauer (Modellersteller).

Le fonctionnement de la prévision opérationnelle est réglée par le plan de la mise en oeuvre qui est exposé dans le centre de prévision avec lequel tous les intéressés sont familier. Ce plan peut être obtenu auprès de l'IffH, sur demande.

Voici quelques règles importantes pour comprendre la préparation de la prévision:

La disponibilité du personnel de prévision est garantie:

- par des exercices »à blanc« mensuels (saisie de toutes les données, mise en oeuvre du modèle) et
- par saisie journalière de données de base sélectionnées; soit actuellement les hauteurs d'eau de 12 limnimètres et les précipitations de 6h des stations synoptiques du DWD.

Le début ponctuel de la prévision est assuré par l'observation journalière à certaines »stations limnimétriques directrices« sélectionnées:

Station de Rheinfelden, hauteur d'eau critique = 200 cm;
Station de Maxau, hauteur d'eau critique = 600 cm;
Station de Worms, hauteur d'eau critique = 400 cm.

L'acquisition des données commence, quand le niveau d'eau monte à toutes les stations limnimétriques, quand la hauteur critique est dépassée à deux limnimètres directrices au minimum, et quand on peut s'attendre, sur la base de l'analyse météorologique, à une persistance dans la situation atmosphérique impliquant des risques de crue.

Le laps de temps (brut) couvert par la prévision est de deux jours, et débuté à 7 heures le jour de prévision. Par conséquent, pour un intervalle de six heures, la prévision est réalisée pour

13.00 h, 19.00 h
01.00 h, 07.00, 13.00, 19.00 h le premier jour suivant
01.00 h, 07.00 h le deuxième jour suivant.

Comme l'acquisition des données et le calcul exigent approximativement trois heures suivant la routine, la prévision est disponible à peu près entre 10 heures et 11 heures, donc le laps de temps net de la prévision est d'environ 44 à 45 heures.

A l'instant T de la prévision, les fichiers des données, niveaux d'eau (débits) et précipitations, doivent embrasser une période minimale de six jours. L'espace

Der operationelle Vorhersagebetrieb ist geregelt durch den Einsatzplan, der in der Vorhersagezentrale ausliegt und mit dem alle Beteiligten vertraut sind. Der Einsatzplan ist auf Anfrage bei der BfG erhältlich.

Einige für das Verständnis der Vorhersageerstellung wesentliche Regelungen seien hier erläutert:

Die Einsatzbereitschaft des Vorhersagepersonals wird gewährleistet durch:

- etwa monatliche Trockenübungen (Erfassung aller Daten, Modellrechnung) und
- tägliche Erfassung ausgewählter Grunddaten; dies sind z.Zt. 5- oder 7-Uhr-Wasserstandswerte an 12 Pegeln sowie die 6-Std.-Niederschlagssummen der synoptischen DWD-Stationen.

Der rechtzeitige Vorhersagebeginn soll gewährleistet werden durch tägliche Beobachtung von ausgewählten »Richtpegeln«:

Pegel Rheinfelden, kritischer Wasserstand = 200 cm;
Pegel Maxau, kritischer Wasserstand = 600 cm;
Pegel Worms, kritischer Wasserstand = 400 cm.

Die Datensammlung beginnt, wenn der Wasserstand an allen Pegeln steigt, der kritische Wasserstand an mindestens zwei Richtpegeln überschritten ist und wenn aus der Analyse der Wettersituation ein Anhalten der hochwassergefährlichen Wetterlage zu erwarten ist.

Die (Brutto-) Vorhersagezeit beträgt 2 Tage, beginnend um 7.00 Uhr am Vorhersage tag. Bei einem Zeitintervall von 6 Std. wird also vorhergesagt für

13.00, 19.00 Uhr
01.00, 07.00, 13.00, 19.00 Uhr 1. Folgetag
01.00, 07.00 Uhr 2. Folgetag.

Da die Datensammlung und die Rechnung im Routinefall etwa 3 Std. in Anspruch nehmen, steht die Vorhersage etwa zwischen 10.00 und 11.00 Uhr zur Verfügung, d.h. die Nettovorhersagezeit beträgt etwa 44 bis 45 Stunden.

Zum Vorhersagezeitpunkt T müssen die Wasserstands (Abfluß)- und Niederschlagsdateien einen Mindestzeitraum von sechs Tagen umfassen. Davon dient

de temps jusqu'à T-24 heures (jour précédent, à 07.00 h) sert à la »constitution« du débit ou à celle de l'onde de crue, cette dernière étant conditionnée par retenue ou par translation dans le bassin hydrographique. Les 24 heures suivantes jusqu'à l'instant T sont disponibles pour le contrôle de la précision du calcul, c.-à.-d. que les informations obtenues pendant les dernières 24 heures servent à l'amélioration de la prévision. Le modèle RHEINA possède, à cet effet, plusieurs méthodes d'optimisation en fonction du choix des paramètres.

Il existe des méthodes dites »de secours« qui permettent au personnel du service de prévision d'obtenir des prévisions encore utilisables, même en cas d'une panne de la station, de l'ordinateur ou du modèle. Dans de tels cas les mesures suivantes se sont avérées utiles:

- En cas de panne à une station, on estime des valeurs d'approchées, basées sur les valeurs connues des stations voisines ou sur les informations données par les cartes météorologiques.
- Il n'est vraisemblable que le modèle soit totalement hors de fonctionnement. Dans le cas où des sous-programmes ne fonctionneraient pas, la reconstitution par étapes du fichier est toujours encore possible, soit manuellement (p. ex. sur l'écran) soit par choix de paramètres de commande appropriés.
- En cas d'une panne de l'ordinateur, une prévision estimée n'est possible que par comparaison de la situation des débits actuelle et des conditions météorologiques avec des situations de crue du passé. Les hydrogrammes et pluviogrammes appropriés sont affichés au centre de prévision.
- Les cartes météorologiques du Service Météorologique Allemand sont interprétées par un météorologue expérimenté.

5.6.2 Prévision de la crue de mai 1983 d'après le modèle RHEINA

Dans la figure 5.6.1 la prévision quasi-opérationnelle de la crue et la vérification du calcul ont déjà été montrées comme exemple. Les erreurs restantes après la vérification du calcul peuvent être attribuées au réseau étendu de stations pluviométriques, aux coefficients d'écoulement incorrects, aux lacunes fondamentales du calcul de la concentration du débit (méthode de l'hydrogramme unitaire EINHGL) et aux données de section transversale incertaines (modèle TRANAA). Comme déjà dit dans chapitre 5.6.1.1, on essaye à présent de réduire l'effet de ces sources d'erreurs.

die Zeitspanne bis T-24 Std. (Vortag 07.00 Uhr) zum »Aufbau« des Abflusses, ggf. der Hochwasserwelle, hydrologisch bedingt durch Retention und Translation im Einzugsgebiet. Die darauffolgenden 24 Stunden bis zum Zeitpunkt T stehen für die Überprüfung der Rechengenauigkeit zur Verfügung, d.h., die Informationen aus der Zeitspanne der letzten 24 Stunden können zur Verbesserung der Vorhersage benutzt werden. RHEINA besitzt hierfür je nach Parameterwahl mehrere Optimierungsmethoden.

Sog. »Vorhersagebehelfe« sollen es dem Vorhersagepersonal ermöglichen, auch bei Stations- und/oder Rechner- und/oder Modellausfall das für die gegebene Situation brauchbarste Ergebnis zu ermitteln. Hierzu ist z.B. dienlich:

- Ermittlung von Näherungswerten bei Stationsausfall aus bekannten Werten von Nachbarstationen oder aus Wetterkarten-Informationen.
- Ein totaler Modellausfall ist nicht zu erwarten. Fallen einzelne Unterprogramme aus, so ist entweder manuell (z.B. Bildschirm) oder durch Wahl von geeigneten Steuerparametern ein sukzessiver Dateiaufbau möglich.
- Bei Rechnerausfall kann eine geschätzte Vorhersage nur durch Vergleich der aktuellen Abfluß- und Wettersituationen mit zurückliegenden Hochwasserlagen erstellt werden. Entsprechende Abfluß- und Niederschlagsganglinien sind im Vorhersagezentrum ausgehängt.
- Die DWD-Wetterkarten und die METEOSAT-Bilder werden durch einen erfahrenen Meteorologen interpretiert.

5.6.2 Die Vorhersage des Hochwassers vom Mai 1983 nach dem Modell RHEINA

Als Beispiel wurde bereits in Abbildung 5.6.1 die quasi-operationelle Vorhersage der Hochwasserwelle und ihre Nachrechnung gezeigt. Die verbleibenden Fehler bei der Nachrechnung können auf das weitmaschige Netz der Niederschlagsstationen, auf fehlerhafte Abflußbeiwerte, auf grundsätzliche Mängel bei der Berechnung der Abflußkonzentration (Einheitsganglinienverfahren EINHGL) und auf unsichere Querprofilaten (Modell TRANAA) zurückgeführt werden. Wie bereits in Abschnitt 5.6.1.1 aufgeführt, wird gegenwärtig versucht, die Wirkung dieser Fehlerquellen zu reduzieren.

5.7 PRÉVISION DES DÉBITS POUR LOBITH

5.7.1 Description des modèles de prévision

5.7.1.1 Introduction

Vers 1950 on a entrepris le développement aux Pays-Bas d'un modèle de prévision de crues pour la station de Lobith. Il s'agissait d'un modèle empirique, utilisant comme entrée des données de débits relevées en amont de Lobith et permettant de faire des prévisions à 1, 2, 3 et 4 jours d'échéance. En 1980, on a commencé à élaborer un nouveau modèle de prévision. Cette fois-ci, il s'agissait d'un modèle stochastique faisant intervenir des régressions multiples linéaires. La première version de ce modèle fut utilisée opérationnellement dès le début de 1981, et cela en parallèle avec le modèle empirique, déjà suranné. Lors des crues de février 1980, on utilisait donc encore le modèle empirique, ce qui a abouti aux résultats présentés dans le paragraphe 5.7.2. On donnera d'abord une description de ce modèle empirique, puis ensuite, une du modèle utilisé actuellement.

5.7.1.2 Le modèle empirique

Le modèle empirique reposait sur l'observation des niveaux d'eau de cinq stations du Rhin et de six stations sur les principaux affluents (voir figure 5.7.1). Ces niveaux d'eau étaient transformés en débits, après quoi on additionnait au débit du Rhin les débits des affluents, en prenant en compte les temps d'écoulement. En outre, le modèle affectuait des corrections pour tenir compte des écoulements non-stationnaires et des erreurs systématiques.

Les temps d'écoulement étaient prises en compte de la façon suivante: pour faire des prévisions à n jours d'échéance, on faisait appel aux débits aux stations, séparées de Lobith par un temps d'écoulement de n jours. Par exemple pour faire des prévisions à 1 jour d'échéance, on utilisait les débits de Cologne/Rhin et de Wetter/Ruhr, ayant un temps d'écoulement jusqu'à Lobith de $1\frac{1}{4}$ respectivement de $1\frac{1}{6}$ jours. Ceci exigeait des corrections de temps; ainsi on utilisait les débits à Cologne à 02.00h le jour d'émission pour faire une prévision valable à Lobith à 08.00h le lendemain. L'apport du bassin intermédiaire a été pris en compte empiriquement, en fonction des affluents inclus dans le modèle.

Les débits non-stationnaires ($d^Q/dt \neq 0$) ont été pris en compte, dans la prévision des débits du premier jour après la date d'émission, par addition ou par soustraction d'une partie de la diminution, respectivement de l'augmentation, des débits, depuis le jour précédent. Pour le trajet de Maxau à Cologne, cette correction valait la moitié de cette variation depuis le jour précédent,

5.7 ABFLUßVORHERSAGE LOBITH

5.7.1 Beschreibung der Vorhersagemodelle

5.7.1.1 Einleitung

Etwa um 1950 wurde in den Niederlanden die Entwicklung eines Hochwasservorhersagemodelles für den Pegel Lobith in Angriff genommen. Es handelte sich um ein empirisches Modell, wozu als Eingabe Abflußdaten oberhalb von Lobith benutzt wurden, und das Vorhersagen für 1, 2, 3 und 4 Tage lieferte. Im Jahre 1980 wurde mit der Entwicklung eines neuen Vorhersagemodelles begonnen. Dieses Mal handelte es sich um ein stochastisches Modell, das auf Mehrfach- und Linearregression basierte. Die erste Fassung dieses Modelles wird seit Anfang 1981 neben dem empirischen, mittlerweile veralteten Modell, operationell betrieben. Während des Hochwassers vom Februar 1980 wurde also noch das empirische Modell angewandt, was zu den im Abschnitt 5.7.2 behandelten Ergebnissen geführt hat. Zunächst wird dieses empirische Modell beschrieben, wonach eine Erläuterung des jetzt betriebenen Modelles folgt.

5.7.1.2 Das empirische Modell

Das empirische Modell basierte auf den Wasserständen von fünf Rheinpegeln und von sechs Pegeln der wichtigsten Nebenflüsse (siehe Abbildung 5.7.1). Diese Wasserstände wurden in Abflüsse umgerechnet und unter Berücksichtigung der Fließzeiten zu denjenigen der Nebenflüsse aufaddiert. Daneben enthielt das Modell Korrekturen für instationäre Abflüsse und systematische Fehler.

Die Fließzeiten wurden auf nachstehende Weise berücksichtigt: zur Erstellung einer Vorhersage für n Tage wurden Abflüsse solcher Pegel benutzt, deren Fließzeit bis Lobith etwa n Tage beträgt. Für die eintägige Vorhersage wurden z.B. die Abflüsse vom Pegel Köln/Rhein und vom Pegel Wetter/Ruhr mit einer Fließzeit bis Lobith von $1\frac{1}{4}$ bzw. $1\frac{1}{6}$ Tag benutzt. Dieses Verfahren erforderte Zeitkorrekturen; für die 08.00 Uhr-Vorhersagen am Folgetag eigneten sich daher die Abflüsse am Pegel Köln von 02.00 Uhr des Ausgabetages. Die Berücksichtigung der Abflüsse von den Restflächen erfolgte empirisch durch Anbindung an die im Modell enthaltenen Nebenflüsse.

Nichtstationäre Abflüsse ($d^Q/dt \neq 0$) wurden im Abfluß des 1. Folgetages durch Addition oder Subtraktion eines Teiles des Abflußrückganges bzw. der Abflußzunahme seit dem Vortag berücksichtigt. Diese Korrektur betrug zwischen Maxau und Köln 50% und zwischen Köln und Lobith ein Drittel der Änderung seit dem Vortag. Aufgrund festgestellter Abweichungen

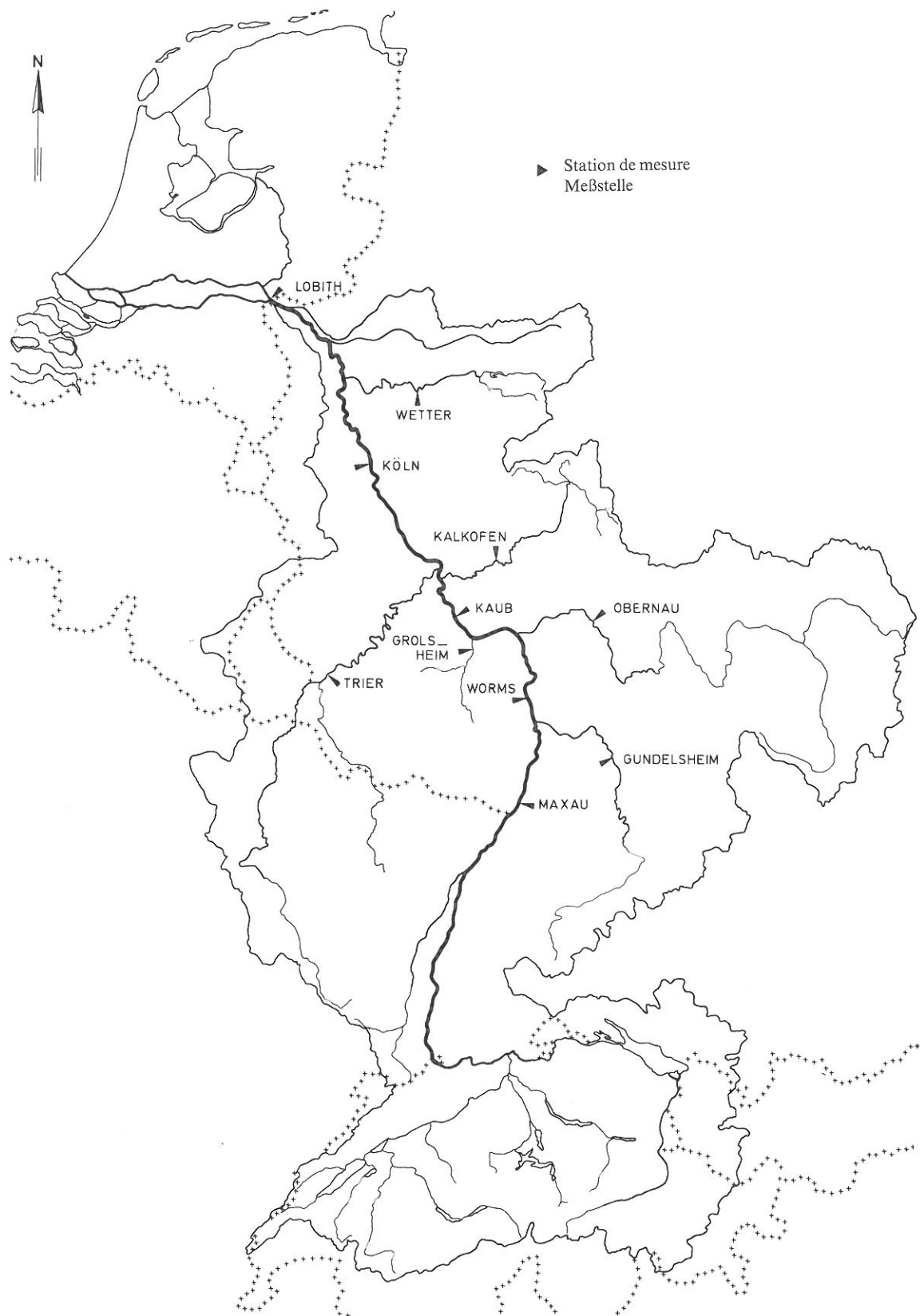


Fig. 5.7.1 Stations utilisées pour le modèle empirique

Abb. 5.7.1 Für das empirische Modell angewandte Pegel

et pour le trajet de Cologne à Lobith, elle était d'un tiers. A cause des écarts avec les valeurs observées, on a apporté des corrections, soit constantes, soit basée sur un pourcentage des débits. Finalement, on a apporté des corrections liées aux écarts d'avec les prévisions les plus récentes (une sorte de moyenne mobile). Ces corrections se composaient de la moitié de l'erreur le jour précédent, plus un quart de l'erreur deux jours auparavant plus une huitième de l'erreur trois jours auparavant. L'équation du débit de Lobith prévu le jour N pour le jour suivant est:

$$\begin{aligned} \text{Lobith}_{N+1} = & C_N + W_N \\ & - \frac{1}{2}(C_N - C_{N-1}) - \frac{1}{2}(W_N - W_{N-1}) \\ & - 0,08 \cdot C_N - \frac{1}{2}E_N - \frac{1}{4}E_{N-1} - \frac{1}{8}E_{N-2} \\ & - \dots \end{aligned} \quad (\text{équation 1})$$

où: C_N = débit à Cologne le jour N
 W_N = débit à Wetter le jour N
 E_N = erreur dans la prévision pour le jour N
 $N = L_N(\text{observé}) - L_N(\text{prévu})$

Si la prévision est faite à 2 jours, le débit s'élève à:

$$\begin{aligned} \text{Lobith}_{N+2} = & C_{N+1} + W_{N+1} \\ & - \frac{1}{2}(C_{N+1} - C_N) - \frac{1}{2}(W_{N+1} - W_N) \\ \text{etc.} \end{aligned} \quad (\text{équation 2})$$

où: C_{N+1} est calculé à Kaub, Kalkofen et Trèves de la même façon que dans l'équation 1 et W_{N+1} est à estimer selon les vues personnelles de l'opérateur, en prenant en considération les prévisions météorologiques.

Les résultats obtenus avec ce modèle n'étaient pas très satisfaisants et comportaient des erreurs systématiques. Ceci était probablement partiellement dû au fait que le modèle n'avait jamais été mis à jour avec des courbes de débits corrigées, ni adapté à la morphologie fluviale modifiée. Cette mise à jour aurait sans doute demandé beaucoup de temps et d'efforts, sans donner nécessairement des résultats significativement meilleurs. C'est pourquoi on a décidé, vu également le besoin urgent d'un modèle de prévision satisfaisant, de faire intervenir des régressions linéaires multiples. Ce projet offrait l'avantage d'utiliser un programme de régression déjà éprouvé, ce qui devait permettre une mise en oeuvre rapide du modèle de prévision. Ce modèle de prévision permet également d'utiliser les données pluviométriques comme variables indépendantes. Le paragraphe suivant en donne une description plus détaillée.

5.7.1.3 Le modèle stochastique

Le modèle stochastique utilisé opérationnellement fait intervenir des régressions linéaires et multiples, est

wurden Korrekturen vorgenommen, die aus einer konstanten Menge oder einem Prozentsatz des Abflusses bestanden. Weiter wurden Korrekturen für die in den letzten Vorhersagen festgestellten Fehler (eine Art gleitender Mittelwert) angebracht. Diese Verbesserungen bestanden aus der Hälfte des Fehlers am Tag vor dem Ausgabetag plus ein Viertel des Fehlers 2 Tage vor dem Ausgabetag plus ein Achtel des Fehlers 3 Tage vor dem Ausgabetag. Gilt für den Ausgabetag $t=0$, so lautet die eintägige Abflusvorhersage für den Pegel Lobith mit der Tagesnummer N:

$$\begin{aligned} \text{Lobith}_{N+1} = & C_N + W_N \\ & - \frac{1}{2}(C_N - C_{N-1}) - \frac{1}{2}(W_N - W_{N-1}) \\ & - 0,08 \cdot C_N - \frac{1}{2}E_N - \frac{1}{4}E_{N-1} - \frac{1}{8}E_{N-2} \\ & - \dots \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 1})$$

wobei: C_N = Abfluß Köln am Tag N
 W_N = Abfluß Wetter am Tag N
 E_N = Fehler in der Vorhersage für den Tag N = $L_N(\text{beob.}) - L_N(\text{vorherges.})$

Die zweitägige Vorhersage lautet:

$$\begin{aligned} \text{Lobith}_{N+2} = & C_{N+1} + W_{N+1} \\ & - \frac{1}{2}(C_{N+1} - C_N) - \frac{1}{2}(W_{N+1} - W_N) \\ \text{usw.} \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 2})$$

wobei: C_{N+1} in Kaub, Kalkofen und Trier auf gleiche Weise wie in Gleichung 1 abgeleitet wurden und W_{N+1} aus der persönlichen Sicht der Diensttuenden Person und unter Berücksichtigung der Wettervorhersagen abzuschätzen ist.

Die Ergebnisse dieses Modelles waren nicht sehr genau und wiesen systematische Fehler auf. Dies ist wahrscheinlich teilweise darauf zurückzuführen, daß das Modell niemals aufgrund der verbesserten Abflußkurven aktualisiert und auch nicht an die geänderte Flußmorphologie angepaßt wurde. Diese Aktualisierung wäre wahrscheinlich aufwendig gewesen und hätte nicht unbedingt zu bedeutend besseren Ergebnissen geführt. Somit wurde auch wegen des Bedarfs an einem befriedigenden Modell beschlossen, Mehrfach- und Linearregressionen anzuwenden. Da man schon über ein Rechenprogramm, das solche Techniken enthielt verfügte, war ein schneller Einsatz möglich. Damit ließ sich auch die Variable »Niederschlagsmenge« berücksichtigen. Der nächste Abschnitt gibt eine detaillierte Beschreibung dieses Modelles.

5.7.1.3 Das stochastische Modell

Das angewandte stochastische Modell basiert auf Mehrfach- und Linearregressionen, ist linear und teil-

linéaire et en partie autorégressif. Les variables d'entrée pour ce modèle sont les hauteurs d'eau journalières et les hauteurs de précipitations disponibles opérationnellement. Bien que du point de vue hydrologique, il soit préférable d'utiliser les débits, cela posait des problèmes en pratique, lors de l'application et cette question sera traitée plus loin. Le modèle calcule les hauteurs d'eau pour Lobith, prévues à 1, 2, 3 et 4 jours d'échéance.

Comme les dépendances des niveaux d'eau entre eux et surtout les dépendances entre les niveaux d'eau et les hauteurs des précipitations ne sont pas linéaires, on a établi 3 modèles distincts correspondant aux 3 classes de débits (hauteurs d'eau) suivant(e)s:

- classe I: $Q < 2500 \text{ m}^3/\text{s}; H < 10,70 \text{ m}$
= modèle 1
- classe II: $2500 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 4500 \text{ m}^3/\text{s};$
 $10,70 \text{ m} < H < 13,00 \text{ m}$
= modèle 2
- classe III: $Q > 4500 \text{ m}^3/\text{s}; H > 13,00 \text{ m}$
= modèle 3

A titre de comparaison, le débit moyen annuel à Lobith est de $2200 \text{ m}^3/\text{s}$; en moyenne, un débit de $4500 \text{ m}^3/\text{s}$ est dépassé 2 fois par an.

Une étude d'optimisation, avec des combinaisons différentes de stations et de périodes a montré que, pour une période de 5 jours, l'on obtient les meilleurs résultats en partant d'une dizaine de stations limnimétriques (parmi lesquelles Lobith) et d'environ huit stations pluviométriques. Les stations retenues sont indiquées dans la figure 5.7.2. L'équation de la prévision, par exemple pour 1 jour d'échéance, peut donc s'écrire de la façon suivante:

$$L_t = A_0 + A_1 \cdot L_{t-1} + A_2 \cdot L_{t-2} + \dots + A_5 \cdot L_{t-5} + A_6 \cdot C_{t-1} + A_7 \cdot C_{t-2} + \dots + A_{10} \cdot C_{t-5} + \dots + A_{90} \cdot \text{Stu}_{t-5}$$

- où: A_0 = constante
- L_t = hauteur d'eau à Lobith à l'instant t
- C = hauteur d'eau à Cologne
- Stu = précipitations à Stuttgart

Les paramètres A_1 jusqu'à A_{90} sont calculés par la méthode des moindres carrés.

Le troisième modèle n'utilise comme entrée que 6 stations (dont 2 stations pluviométriques) pour 3 périodes, et fait donc intervenir 18 paramètres, plus une constante. Les paramètres des trois modèles sont calculés à partir de données de la période de 1977 à 1980 inclus.

weise autoregressiv. Eingangsvariablen für dieses Modell sind die operationell vorhandenen täglichen Wasserstände und Niederschlagsmengen. Obwohl die Verwendung von Abflüssen aus hydrologischer Sicht zu bevorzugen wäre, ergaben sich bei der praktischen Durchführung Probleme; hierauf wird später noch eingegangen. Das Modell berechnet Wasserstände am Pegel Lobith für 1, 2, 3 und 4 Tage im voraus.

Da die Beziehungen zwischen den Wasserständen untereinander und insbesondere zwischen den Wasserständen und Niederschlagsmengen nicht linear sind, wurden nach den 3 nachstehenden Abfluß- (Wasserstands-)klassen 3 Modelle unterschieden:

- Klasse I: $Q < 2500 \text{ m}^3/\text{s}; H < 10,70 \text{ m}$
= Modell 1
- Klasse II: $2500 \text{ m}^3/\text{s} < Q < 4500 \text{ m}^3/\text{s};$
 $10,70 \text{ m} < H < 13,00 \text{ m}$
= Modell 2
- Klasse III: $Q > 4500 \text{ m}^3/\text{s}; H > 13,00 \text{ m}$
= Modell 3

Zum Vergleich: Der mittlere jährliche Abfluß beträgt bei Lobith $2200 \text{ m}^3/\text{s}$; ein Wert von $4500 \text{ m}^3/\text{s}$ wird im Durchschnitt 2 mal pro Jahr überschritten.

Eine Optimierungsuntersuchung mit verschiedenen Kombinationen von Pegeln und Meßzeiten (Tagen) hat ergeben, daß etwa 10 Pegel (einschließlich Lobith), etwa 8 Niederschlagsmeßstellen und ein Zeitraum von 5 Tagen das beste Ergebnis liefert. Die betrachteten Pegel sind in Abbildung 5.7.2 dargestellt. Die Gleichung für die Vorhersage, z.B. für 1 Tag, lautet dann:

$$L_t = A_0 + A_1 \cdot L_{t-1} + A_2 \cdot L_{t-2} + \dots + A_5 \cdot L_{t-5} + A_6 \cdot C_{t-1} + A_7 \cdot C_{t-2} + \dots + A_{10} \cdot C_{t-5} + \dots + A_{90} \cdot \text{Stu}_{t-5}$$

- mit: A_0 = Konstante
- L_t = Wasserstand Lobith zu Zeit t
- C = Wasserstand Köln
- Stu = Niederschlag in Stuttgart

Die Parameter A_1 bis A_{90} werden nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet.

Das dritte Modell benutzt als Eingabe nur Daten von 6 Meßstellen (davon 2 Niederschlagsstationen) und erfaßt 3 Meßzeiten der Vorperiode. Es hat somit 18 Parameter und eine Konstante. Die Parameter der drei Modelle werden mit Hilfe von Daten aus dem Zeitraum 1977...1980 berechnet.



Fig. 5.7.2 Stations utilisées pour le modèle stochastique

Abb. 5.7.2 Für das stochastische Modell angewandte Pegel

La figure 5.7.4 montre ensuite pour la même période une représentation des prévisions à 1, 2, 3 ou 4 jours d'échéance pour le modèle utilisant les débits et pour $H > 10,70$ m. Il ressort de ce tableau qu'une prévision avec antériorité de 3 jours est déjà assez inexacte, tandis qu'une prévision à 4 jours comporte de grandes erreurs, surtout lorsqu'il s'agit de la montée de l'onde de crue.

En pratique, les résultats des différents modèles sont utilisés pour l'évaluation de la prévision définitive. Ensuite, un ajustement est fait à partir des conditions hydrologiques dans la région et compte tenu des précipitations prévues. Ce n'est qu'après l'analyse d'un «pronostiqueur» expérimenté que la prévision est donnée. Pendant les périodes de crues extrêmes, on utilise en outre les prévisions disponibles, de République fédérale d'Allemagne. La Suisse tient chaque jour à disposition les hauteurs d'eau prévues pour Rheinfelden.

En 1984 on est passé du modèle basé sur les niveaux à celui basé sur les débits. En même temps, la période d'étalonnage de 1979 à 1983 a remplacé celle de 1977 à 1980.

5.7.2 Prévision de l'onde de crue de février 1980

En février 1980, on ne disposait que du modèle empirique, décrit dans le paragraphe 5.7.1.2, pour la prévision d'une onde de crue. Les résultats fournis par ce modèle, ainsi que les données sur les précipitations tombées et les précipitations prévues, par le Service météorologique néerlandais (KNMI), furent interprétées par l'hydrologue de service, qui émit la prévision définitive sur la base de son discernement et de son expérience personnelle.

Les prévisions à 1, 2, 3 et 4 jours d'échéance, calculées à partir des données disponibles au 1er, 2, ..., 9 février, sont représentées dans les figures 5.7.5, 5.7.6, 5.7.7 et 5.7.8 par une ligne traitillée. Seules les figures 5.7.5a et 5.7.6a montrent conjointement (à une autre échelle) les différences entre les hauteurs prévues et les hauteurs observées, ce qui en facilite la comparaison. On voit que le moment de la crue maximale est prévu avec un retard et que sa valeur prévue est trop élevée, de sorte que le moment de la crue maximale est prévu avec un retard, tandis que la valeur prévue est trop élevée, ce qui est bien illustré dans la figure 5.7.9. Celle-ci montre les prévisions pour le 8, 9, 10 et 11 février, faites à partir des données disponibles au 7 février. Sur la base de l'expérience acquise, ces prévisions furent «corrigées» manuellement avant d'être émises (ligne pointillée). Même pour les prévisions corrigées de cette façon, il ressort de la figure 5.7.9, que la hauteur de la crue maximale est encore surestimée. De même le moment où la crue se produit reste encore prévu avec un retard.

In Abbildung 5.7.4 sind weiter für das Modell, das von Abflüssen für $H > 10,70$ m ausgeht, über denselben Zeitraum die Vorhersagen für 1, 2, 3 und 4 Tage dargestellt. Man sieht, daß die Vorhersage für 3 Tage bereits ziemlich ungenau ist, und daß die Vorhersage für 4 Tage große Fehler aufweist, vor allem beim Anstieg einer Hochwasserwelle.

In der Praxis werden die Ergebnisse der verschiedenen Modelle zur Abschätzung der endgültigen Vorhersage benutzt. Man berücksichtigt darüberhinaus noch die hydrologischen Verhältnisse im Gebiet und den zu erwartenden Niederschlag. Erst nach Beurteilung eines erfahrenen Prognostikers wird schließlich die Vorhersage ausgegeben. Bei sehr hohen Abflüssen werden außerdem die verfügbaren deutschen Vorhersagen benutzt. Die Schweiz stellt täglich vorhergesagte Wasserstandsdaten für den Pegel Rheinfelden zur Verfügung.

Im Jahre 1984 erfolgte die Umstellung vom »Wasserstandsmodell« auf das »Abflußmodell«. Als Analysezeitraum dient die Periode 1979 ... 1983 anstatt 1977 ... 1980.

5.7.2 Vorhersage der Hochwasserwelle vom Februar 1980

Im Februar 1980 stand zur Vorhersage der Hochwasserwelle nur das in Abschnitt 5.7.1.2 beschriebene empirische Modell zur Verfügung. Die Ergebnisse dieses Modelles wurden zusammen mit den Daten des niederländischen Wetterdienstes (KNMI) erhaltenen Daten (gefallener und erwarteter Niederschlag) vom anwesenden Hydrologen interpretiert. Aufgrund seiner Einsicht und Erfahrung bestimmte er die endgültige Vorhersage.

Die mit den am 1., 2., ..., 9. Februar verfügbaren Daten berechneten 1- bis 4-tägigen Vorhersagen sind in den Abbildungen 5.7.5, 5.7.6, 5.7.7 und 5.7.8 gestrichelt dargestellt. Nur die Abbildungen 5.7.5a und 5.7.6a enthalten auch die Unterschiede zwischen vorhergesagten und beobachteten Wasserständen (in einem anderen Maßstab), so daß ein Vergleich erleichtert wird. Man erkennt, daß der Zeitpunkt der Spitze zu spät und ihr Wert zu hoch vorhergesagt wird, was besonders in Abbildung 5.7.9 deutlich wird. Dort ist die anhand der am 7. Februar verfügbaren Daten berechnete Vorhersage für den 8., 9., 10. und 11. Februar dargestellt. Auf Grund von Erfahrung wurde diese Vorhersage vor der Herausgabe manuell korrigiert (punktierter Linie). Auch in den so korrigierten Vorhersagen zeigte sich der Wert der Spitze immer noch etwas zu hoch und ihr Zeitpunkt immer noch etwas zu spät.

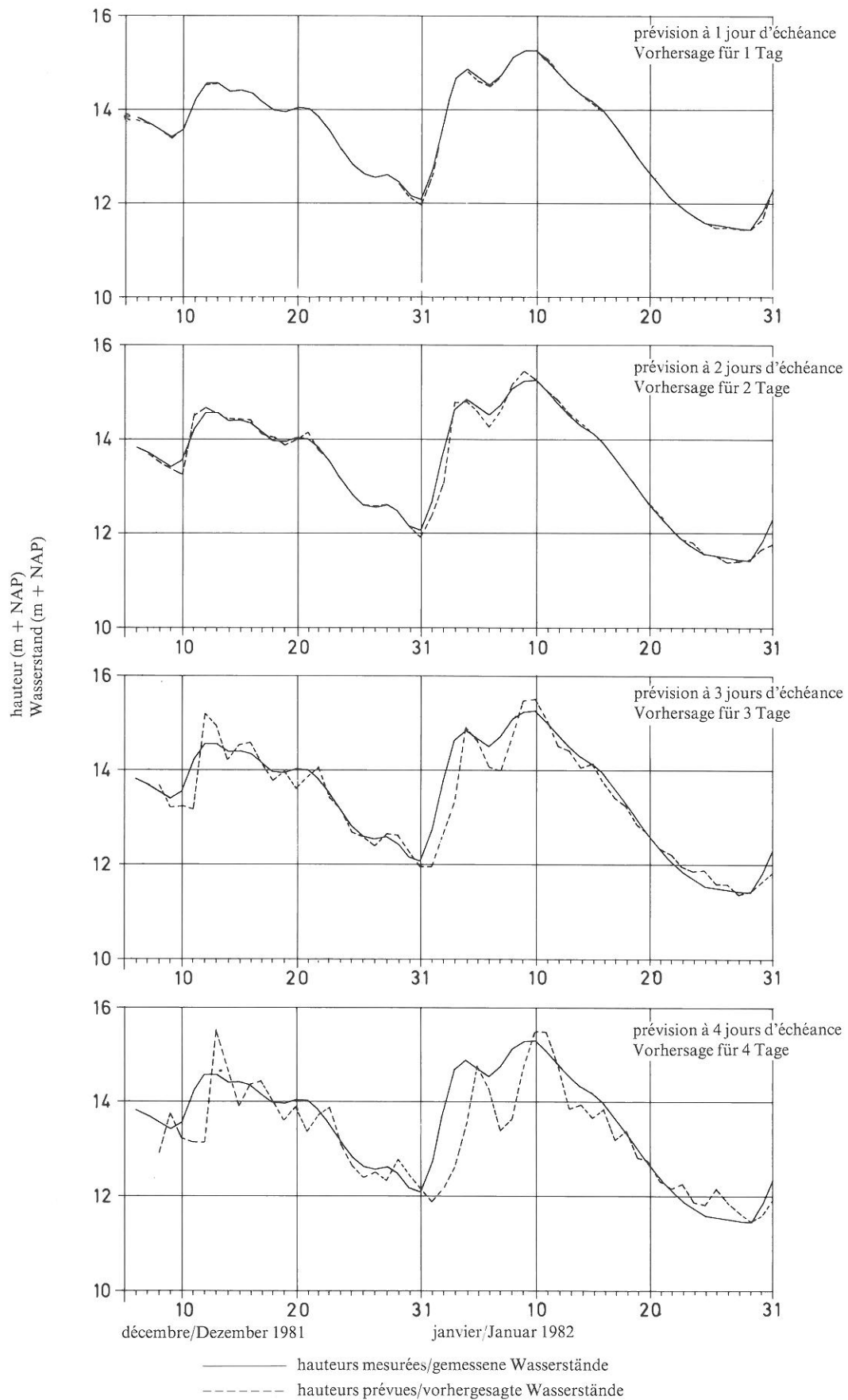


Fig. 5.7.4 Prévisions au moyen du modèle B: Q + P; H > 10,70 m

Abb. 5.7.4 Vorhersagen mit Modell B: Q + P; H > 10,70 m

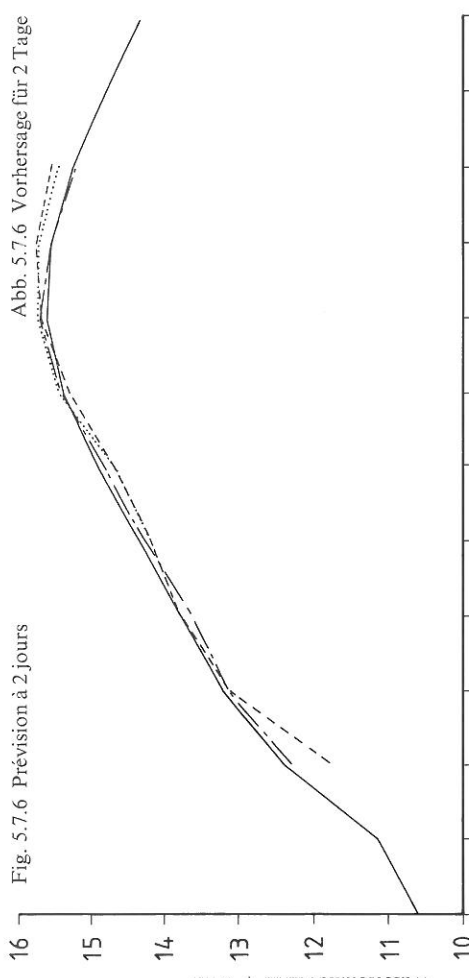
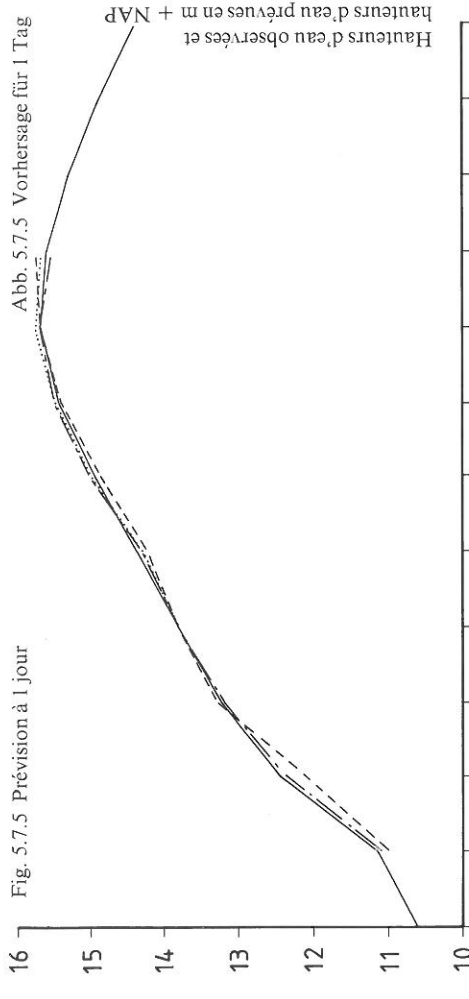
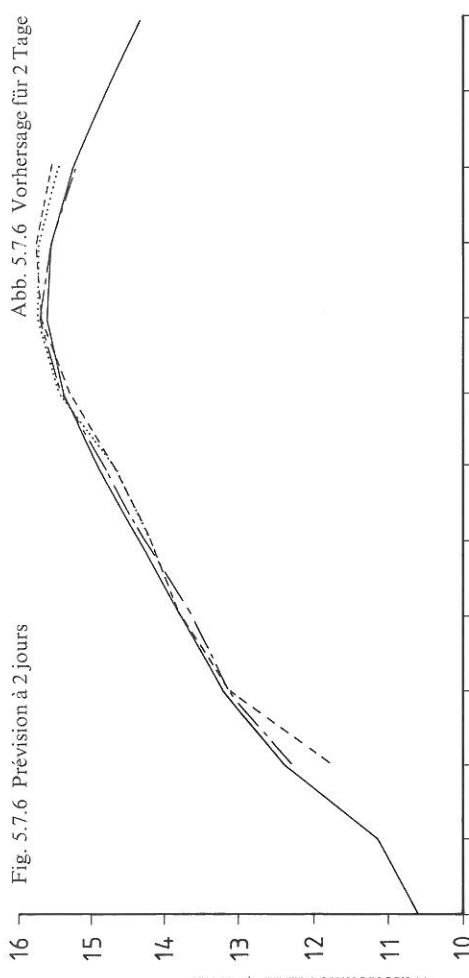
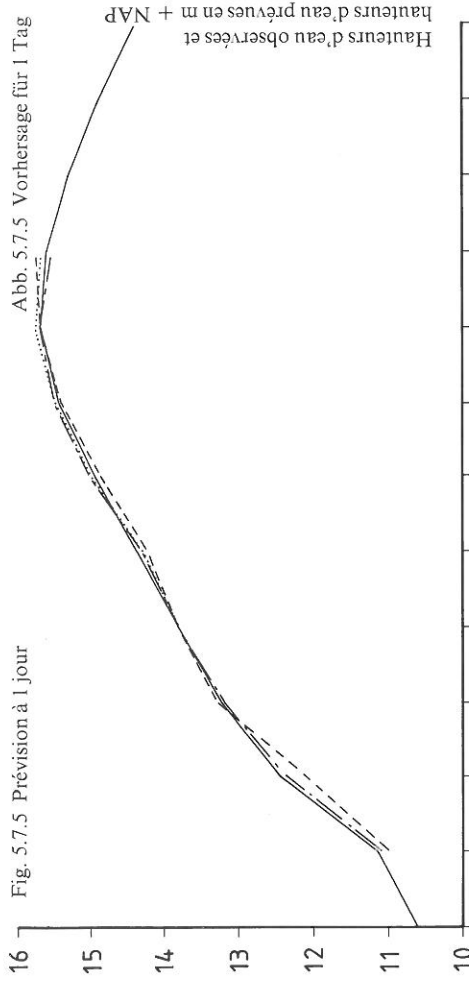
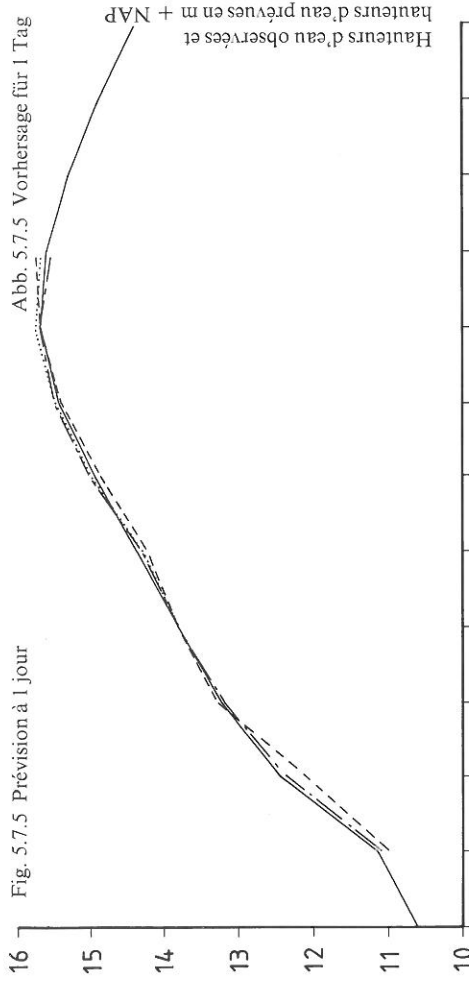
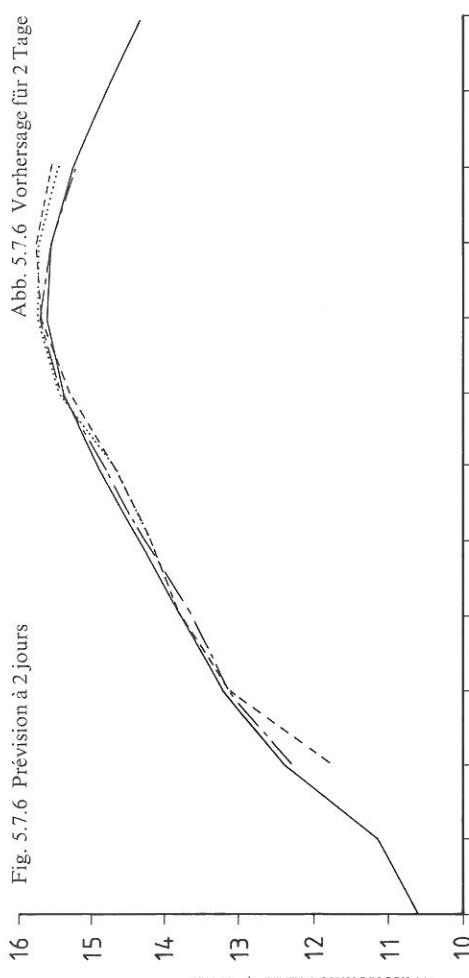
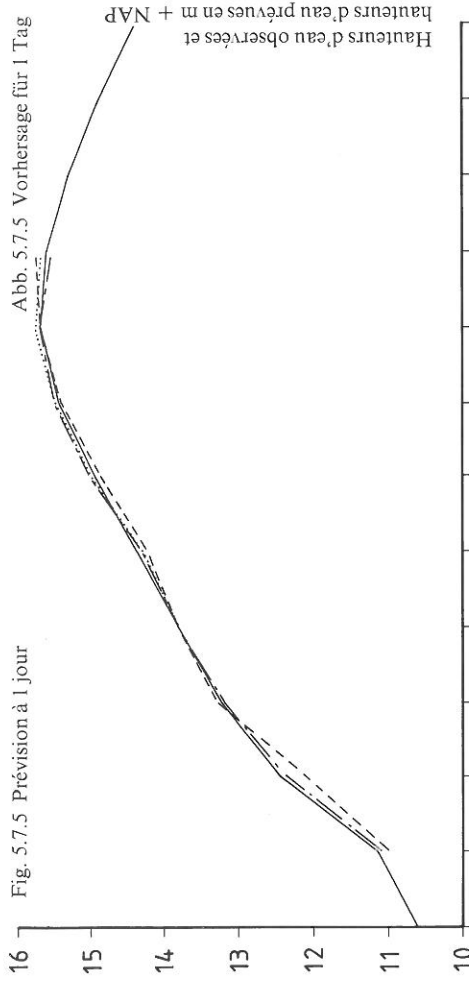
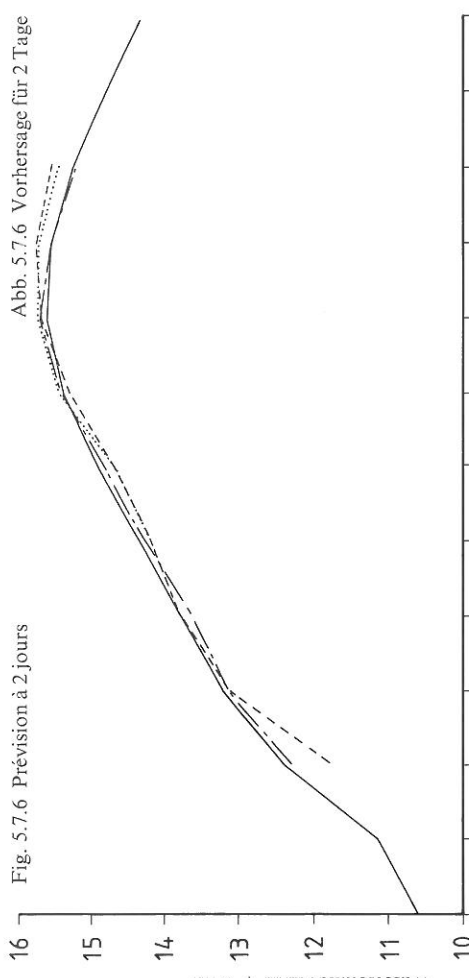
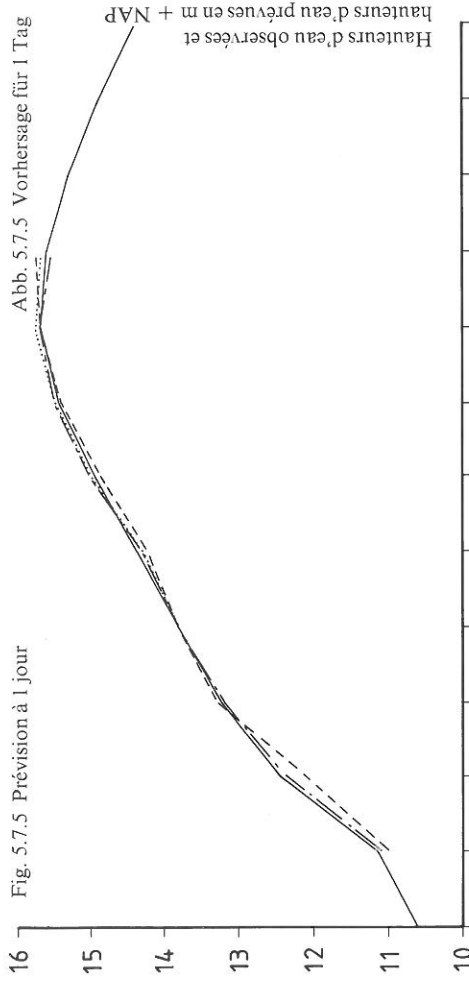
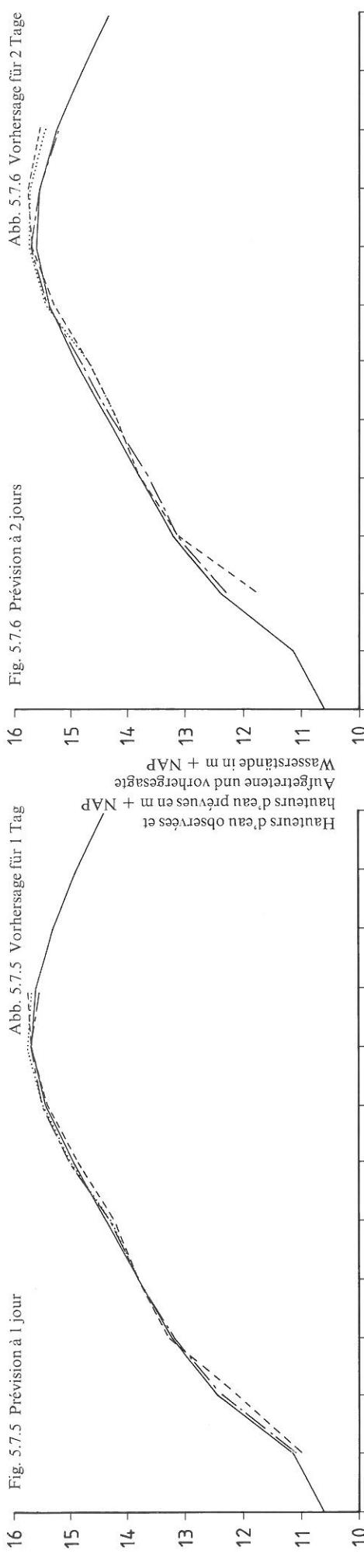


Fig. 5.7.5-5.7.8 Pointe de crue du 9 février 1980 à Lobith

Abb. 5.7.5-5.7.8 Hochwasserspitze 9. Februar 1980 bei Lobith

Les résultats du modèle stochastique de prévisions de débits, utilisé actuellement, sont représentés dans les figures 5.7.5 à 5.7.9, au moyen d'une ligne point-traitillée. La figure 5.7.9 montre que la prévision de la valeur de la crue maximale, faite à partir des données disponibles au 7 février, est toujours encore trop élevée. Toutefois les figures 5.7.5, 5.7.6 et 5.7.7 (et dans une moindre mesure figure 5.7.8) illustrent également que le »nouveau« modèle apporte une amélioration par rapport à »l'ancien« modèle. En ce qui concerne la prévision de la pointe de crue, il est à noter ce qui suit: la prévision de la crue maximale, faite au moyen de »l'ancien« modèle donne la valeur la plus élevée. Le 6 février on a calculé pour le 10 février une hauteur d'eau de 16,17 m + NAP (c.-à.-d. que la hauteur calculée a été supérieure de 48 cm à la hauteur d'eau observée). Cette hauteur fut alors réduite manuellement à 16,05 m + NAP, ce qui est toujours 36 cm de trop. A l'aide du »nouveau« modèle on obtient une hauteur maximale de 15,75 m + NAP, donc seulement 6 cm de trop.

Die Ergebnisse des jetzt betriebenen stochastischen Abflußmodelles sind in den Abbildungen 5.7.5 bis 5.7.9 strichpunktiert eingezeichnet. Abbildung 5.7.9 zeigt, daß auf der Basis der am 7. Februar verfügbaren Daten der Wert der Spitze nachwievor etwas zu hoch vorhergesagt ist. Die Abbildungen 5.7.5, 5.7.6 und 5.7.7 (und in geringerem Maße 5.7.8) zeigen aber auch eine Verbesserung des »neuen« Modells gegenüber dem »alten«. Bezüglich der Vorhersage des Spitzenwertes ist festzustellen: Das »alte« (damals benutzte) Modell liefert den höchsten Rechenwert. Am 6. Februar wurde für den 10. Februar ein Stand von 16,17 m + NAP vorhergesagt (d.h. 48 cm zu hoch im Vergleich zu dem gemessenen Wasserstand). Dieser vorhergesagte Wasserstand wurde damals manuell auf 16,05 m + NAP reduziert (also immer noch 36 cm zu hoch). Das »neue« Modell ergibt als Höchstwert 15,75 m + NAP, also nur noch 6 cm zu viel.

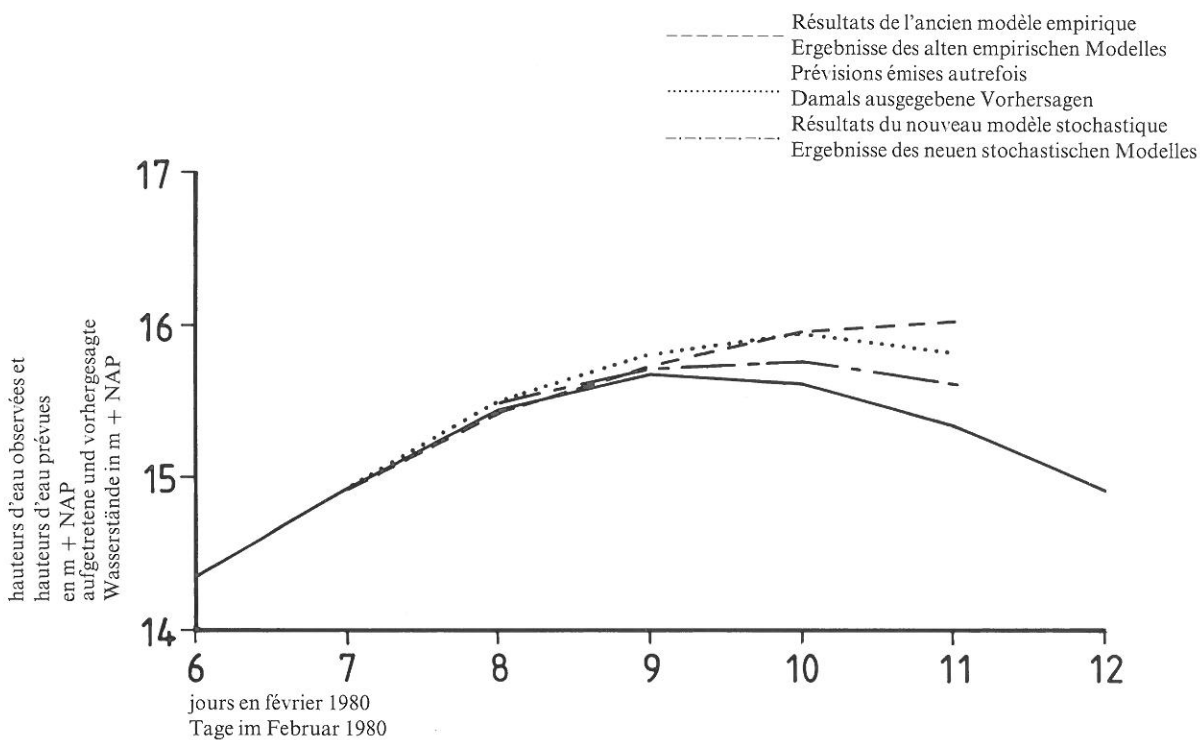


Fig. 5.7.9 Prévisions du 7 février pour les 8, 9, 10 et 11 février 1980

Abb. 5.7.9 Vorhersage am 7. Februar für den 8., 9., 10. und 11. Februar 1980

En résumé, il ressort du chapitre 5.7.1.3 que dans le cas traité ci-dessus, on peut émettre des prévisions fiables à 1 et 2 jours d'échéance pour Lobith; des prévisions à 3 jours sont moins fiables, tandis que des prévisions de valeurs maximales à 4 jours ont peu de sens à présent.

Zusammenfassend geht aus Abschnitt 5.7.1.3 hervor, daß im vorliegenden Fall zuverlässige 1- bis 2-tägige Vorhersagen für Lobith möglich sind; 3-tägige Vorhersagen sind weniger zuverlässig, 4-tägige Scheitelvorhersagen erfüllen ihren Zweck nicht.

6. RÉSUMÉ

Les services hydrologiques actifs dans le bassin du Rhin utilisent divers modèles mathématiques pour la prévision journalière des niveaux d'eau et des débits. L'introduction du présent rapport (chapitre 1) donne une brève description de ces modèles. Actuellement il s'agit de sept modèles:

- RHEINFELDEN pour la station de Rheinfelden/Rhin (EPF-Zürich et Service hydrologique et géologique national, Berne);
- ILL pour la station de l'Ill à Colmar (Service Régional de l'Aménagement des Eaux d'Alsace, Colmar);
- MOSELLE pour six stations sur le tronçon français de la Moselle (Service de la Navigation de Nancy);
- SARRE pour trois stations sur le tronçon français de la Sarre (Service de la Navigation de Strasbourg);
- MKF pour diverses stations dans le bassin du Rhin (Institut fédéral d'Hydrologie, Coblenz);
- RHEINA pour diverses stations du Rhin supérieur et du Neckar (Institut fédéral d'Hydrologie, Coblenz);
- LOBITH pour la station de Lobith/Rhin (Rijkswaterstaat, Lelystad).

L'interprétation des questionnaires qui figure dans chapitre 2 permet de comparer la structure des modèles, le but des prévisions, l'état d'avancement de la prévision et les données nécessaires pour l'étalonnage et l'exploitation.

Le chapitre 3 décrit l'évolution historique de la prévision des niveaux d'eau et des débits depuis les commencements mêmes chez les Sumériens et les Egyptiens jusqu'au présent. Impressionnants sont les succès des météorologues et des hydrologues de plusieurs pays de l'Europe centrale dans l'installation de stations de jaugeage et de systèmes de transmission de données. Ces systèmes datent de la fin du 18^{ème} siècle. Cet exposé historique montre que les modèles de prévision susmentionnés sont l'aboutissement d'efforts longs et intenses visant à discerner à temps les dangers des crues et par conséquent à les atténuer.

Les conditions météorologiques d'août 1978 et de janvier/février 1980, qui ont entraîné des ondes de crues prononcées dans le bassin du Rhin, sont décrites au chapitre 4. Les sept modèles susmentionnés ont été utilisés pour la prévision des niveaux d'eau et des débits comme aussi, après coup, pour le calcul de l'hydrogramme de ces crues.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Im Einzugsgebiet des Rheins werden von den hydrologischen Diensten verschiedene mathematische Modelle zur täglichen Wasserstands- und Abfluvvorhersage betrieben. In der Einleitung des vorliegenden Berichtes (Abschnitt 1) werden diese Modelle kurz beschrieben. Z.Zt. handelt es sich dabei um sieben Modelle:

- RHEINFELDEN für den Pegel Rheinfelden/Rhein (ETH-Zürich und Landeshydrologie und -geologie, Bern);
- ILL für den Ill-Pegel Colmar (Service Régional de l'Aménagement des Eaux d'Alsace, Colmar);
- MOSEL für sechs Pegel an der französischen Moselstrecke (Service de la Navigation de Nancy);
- SAAR für drei Pegel an der französischen Saarstrecke (Service de la Navigation de Strasbourg);
- MKF für diverse Pegel im Rheingebiet (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz);
- RHEINA für diverse Pegel am Oberrhein und am Neckar (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz);
- LOBITH für den Pegel Lobith/Rhein (Rijkswaterstaat, Lelystad).

Die Fragebogenauswertung in Abschnitt 2 ermöglicht einen vergleichenden Überblick über den Modell-aufbau, das Vorhersageziel, den Stand der Vorhersage und die erforderlichen Eich- und Betriebsdaten.

Abschnitt 3 vermittelt die historische Entwicklung der Wasserstands- und Abfluvvorhersage von den ersten Anfängen bei den Sumerern und Ägyptern bis zur Gegenwart. Beeindruckend sind dabei die Erfolge der Meteorologen und Hydrologen mehrerer mitteleuropäischen Länder bei der Einrichtung von Meßstellen und Datenübertragungssystemen. Letztere reichen bis ins ausgehende 18. Jahrhundert zurück. Dieser geschichtliche Überblick weist die o.g. Vorhersagemodelle als den vorläufigen Abschluß einer langen und intensiven Bemühung aus, die durch die Hochwasser verursachten Gefahren rechtzeitig zu erkennen und dadurch zu mildern.

Die meteorologischen Verhältnisse vom August 1978 und Januar/Februar 1980, die zu ausgeprägten Hochwasserwellen im Einzugsgebiet des Rheins führten, sind im Abschnitt 4 beschrieben. Dabei wurden die sieben o.g. Modelle zur Wasserstand- und Abfluvvorhersage bzw. nachträglich zur Berechnung der Ganglinie eingesetzt.

Une description détaillée de tous les modèles est donnée au chapitre 5.

Le modèle RHEINFELDEN utilisé en Suisse est appliqué avec succès à la prévision à long terme ainsi qu'à court terme à la station du même nom. La prévision à court terme porte sur deux jours. La prévision à long terme porte sur un mois et sur deux mois au semestre d'hiver, au semestre d'été à tous les intervalles de plusieurs mois commençant par le mois en cours et se terminant au plus tard par le mois de septembre. La prévision repose sur les données observées de la période antérieure, soit les débits, les hauteurs de précipitations, les températures de l'air et les hauteurs de neige ainsi que sur des prévisions quantitatives des précipitations et de la température.

En France, actuellement trois modèles sont disponibles, pour le bassin du Rhin:

Le modèle ILL a été mis au point pour les prévisions à court terme, afin de répondre à une demande allemande concernant la prévision du débit du Rhin. Il s'agit d'une prévision qui porte sur 6, 12, 18 et 24 heures. Pour la prévision à 6 et 12 heures on utilise comme données d'entrée uniquement des valeurs de débit enregistrées aux stations en amont. Les prévisions à 18 et 24 heures sont aussi basées sur des données de précipitations et de fonte de neige, outre les valeurs de débit.

Les modèles MOSELLE, élaborés en 1978 pour le bassin de la Moselle française, se sont avérés défaillants lors des crues de 1982 et 1983. Par conséquent, les modèles sont actuellement repris. Il est recherché des modèles autorégressifs faisant intervenir la station elle-même et quelques stations hydrométriques amont. Il s'agira de prévisions à court terme de six stations françaises de la Moselle, qui porteront sur 24 heures.

Le modèle SARRE est un modèle stochastique pouvant fournir des prévisions à court terme portant sur 6 et 12 heures à partir des débits et des hauteurs de précipitations des stations en amont. En raison du manque de données de base, le modèle n'est pas opérationnel.

En République fédérale d'Allemagne deux modèles de prévision sont utilisés pour le bassin du Rhin:

Le modèle MKF a été développé spécialement pour la prévision d'étiages à la station de Kaub. Plus tard il a été utilisé également pour la prévision de crues à plusieurs stations du Rhin. Le modèle repose sur des fonctions de transfert entre stations et n'utilise que des valeurs de débit comme données d'entrée. La prévision porte sur 18 heures.

Eine ausführliche Beschreibung aller Modelle erfolgt in Abschnitt 5.

Das in der Schweiz betriebene Modell RHEINFELDEN wird erfolgreich sowohl zu Kurzfristprognosen wie zu Langfristprognosen am gleichnamigen Pegel betrieben. Die kurzfristige Vorhersage erstreckt sich bis zum 2. Folgetag. Die langfristige Prognose bezieht sich im Winterhalbjahr auf einen und auf zwei Monate, im Sommerhalbjahr auf alle mehrmonatigen Intervalle, die mit dem laufenden Monat beginnen und spätestens mit dem September enden. Die Vorhersage stützt sich auf beobachtete Abflußwerte, Niederschlagssummen, Lufttemperaturen und Schneehöhen der Vorperiode, sowie auf quantitative Niederschlags- und Temperaturprognosen.

In Frankreich sind z.Zt. für das Rheingebiet drei Modelle vorhanden:

Das Modell ILL wurde zur Kurzfristvorhersagen entwickelt, um einer deutschen Bitte hinsichtlich der Vorhersage des Rheinabflusses zu entsprechen. Es handelt sich um eine Vorhersage die sich auf 6, 12, 18 und 24 Stunden erstreckt. Für die Vorhersage mit einer Frist von 6 und 12 Stunden werden ausschließlich die an stromaufwärts gelegenen Meßstationen erfaßten Abflußwerte als Eingangsdaten benutzt. Für die Vorhersage mit einer Frist von 18 und 24 Stunden werden neben Abflüssen auch Niederschlags- und Schneeschmelzdaten benutzt.

Die 1978 für den französischen Teil des Einzugsgebietes der Mosel entwickelten Modelle MOSEL, zeigten während der Hochwasserperioden im Winter 1982 und im Frühling 1983 große Fehler. Deshalb werden sie z.Zt. überarbeitet. Es wird dabei gesucht nach autoregressiven Modellen, wobei der betreffende Pegel selbst und einige oberliegende Pegel miteinbezogen werden. Es handelt sich um Kurzfristprognosen an sechs französischen Moselpegeln die sich erstrecken bis auf 24 Stunden.

Das Modell SAAR ist ein stochastisches Modell das anhand von Abflüssen und Niederschlagsmengen der stromaufwärts gelegenen Meßstationen kurzfristige Vorhersagen mit einer Vorhersagezeit von 6 und 12 Stunden liefert. Das Modell ist wegen fehlender Datenbasis nicht operationell.

In der Bundesrepublik Deutschland werden für das Rheingebiet zwei Vorhersagemodelle betrieben:

Das Modell MKF wurde speziell für die Niedrigwasservorhersage am Pegel Kaub entwickelt. Später wurde es ebenfalls für Hochwasservorhersagen an mehreren Rheinpegeln eingesetzt. Das Modell basiert auf Übertragungsfunktionen zwischen Pegeln und benötigt ausschließlich Abflußwerte als Eingangsgrößen. Die Vorhersagezeit erstreckt sich bis auf 18 Stunden.

Le modèle RHEINA est un modèle précipitation-débit déterministe élaboré avant tout pour les besoins de la navigation. La prévision porte sur deux jours.

Aux Pays-Bas, le débit à la station de Lobith est prédit à l'aide du modèle LOBITH. Il s'agit d'un modèle stochastique qui utilise les données journalières des niveaux d'eau et des hauteurs de précipitation, ainsi que les prévisions des débits et des précipitations. Les prévisions portent sur quatre jours au maximum.

Il résulte des descriptions des modèles que l'on utilise des algorithmes mathématiques assez différents mais tous également utilisables. Les modèles RHEINFELDEN, RHEINA et en partie LOBITH utilisent en majeure partie des équations conceptuelles, alors que les autres modèles emploient des relations stochastiques.

Finalement, l'annexe II attire l'attention sur un projet du groupe de travail hydrologique RA-VI de l'OMM qui a recensé les nombreux modèles de prévision utilisés en Europe. En ce qui concerne le bassin du Rhin, les modèles RHEINFELDEN, MKF et LOBITH ont été décrits. En outre, on y retrouve d'autres travaux sur les prévisions: Rheinfelden (prévision à long terme), Raunheim/Main et Bas-Rhin (stations de Coblenz et de Ruhrort). Cette annexe ne fournit pas d'information nouvelle. Comme il s'agit d'un document de l'OMM, on a adopté ses langues de travail l'anglais et le français.

Das Modell RHEINA ist ein deterministisches Niederschlag-Abfluß-Modell das hauptsächlich für die Schifffahrt entwickelt wurde. Es werden Vorhersagen bis zum 2. Folgetag herausgegeben.

In den Niederlanden wird der Abfluß am Pegel Lobith mit dem Modell LOBITH vorhergesagt. Es handelt sich um ein stochastisches Modell das tägliche Wasserstände, Niederschlagsmengen sowie Abfluß- und Niederschlagsprognosen benutzt. Die Vorhersagen werden für maximal vier Tage im voraus erstellt.

Es wird deutlich, daß recht unterschiedliche aber gleichermaßen brauchbare mathematische Algorithmen angegriffen werden, und zwar überwiegend konzeptionelle Ansätze in den Modellen RHEINFELDEN, RHEINA und teilweise auch in LOBITH wie stochastische Beziehungen in den übrigen Modellen.

Schließlich will Anlage II auf ein WMO-Projekt der hydrologischen Arbeitsgruppe RA-VI aufmerksam machen, in dem zahlreiche Vorhersagemodelle aus dem europäischen Raum erfaßt wurden. Aus dem vorliegenden Bericht sind die Modelle RHEINFELDEN, MKF (Pegel Kaub und Koblenz) sowie LOBITH dargestellt. Daneben wurden weitere Vorhersagen übernommen: Rheinfelden (Langfristvorhersage), Raunheim/Main und Niederrhein (Pegel Koblenz und Ruhrort). Diese Anlage vermittelt keine grundsätzliche Neuinformationen. Da es sich um ein WMO-Dokument handelt, wurden die dort benutzten Arbeitssprachen englisch und französisch übernommen.

Beschrijving van hydrologische voorspellingsmodellen in het Rijngebied

6. SAMENVATTING

De hydrologische diensten in het stroomgebied van de Rijn gebruiken verschillende wiskundige modellen bij de dagelijkse voorspelling van waterstanden en afvoeren. De inleiding van dit rapport (hoofdstuk 1) geeft een korte beschrijving van deze modellen. De volgende 7 modellen zijn momenteel voorhanden:

- RHEINFELDEN voor het meetstation Rheinfelden/Rijn (ETH-Zürich en Landeshydrologie und -geologie, Bern);
- ILL voor het station aan de Ill te Colmar (Service Régional de l'Aménagement des Eaux d'Alsace, Colmar);
- MOEZEL voor zes stations aan het Franse gedeelte van de Moezel (Service de la Navigation de Nancy);
- SAAR voor 3 stations aan het Franse gedeelte van de Saar (Service de la Navigation de Strasbourg);
- RHEINA voor verschillende stations aan de Boven-Rijn en aan de Neckar (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz);
- MKF voor verschillende stations in het Rijngebied (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz);
- LOBITH voor het station Lobith/Rijn (Rijkswaterstaat, Lelystad).

De uitwerking van vragenlijsten, die in hoofdstuk 2 volgt, levert een vergelijkend overzicht van de opbouw van de modellen, het doel van de voorspellingen, de stand van de voorspellingen en de benodigde ijk- en werkgegevens.

Hoofdstuk 3 geeft de historische ontwikkeling weer van het voorspellen van waterstanden en afvoeren vanaf het eerste begin bij de Soemeriërs en de Egyptenaren tot aan de tegenwoordige tijd. Indrukwekkend daarbij zijn de goede resultaten die meteorologen en hydrologen uit verscheidene Midden-Europese landen hebben geboekt bij de totstandbrenging van meetstations en systemen van gegevensoverdracht. Deze systemen dateren reeds van het eind van de 18de eeuw. Dit historische overzicht toont aan dat bovengenoemde voorspellingsmodellen een voorlopige afsluiting vormen van de lange reeks intensieve pogingen om de gevaren van hoogwater tijdig te herkennen en daardoor te verminderen.

Description of hydrological forecasting models in the Rhine basin

6. SUMMARY

In the Rhine basin several mathematical models for the forecasting of daily water-levels and discharges are in use by the hydrological services. Short descriptions of these models are given in the introduction of the present report. Currently 7 models are available:

- RHEINFELDEN for the gauging station Rheinfelden/Rhine (ETH-Zurich and Landeshydrologie und -geologie, Bern);
- ILL for the Ill station Colmar (Service Régional de l'Aménagement des Eaux d'Alsace, Colmar);
- MOSELLE for six gauging stations on the French section of the Moselle (Service de la Navigation de Nancy);
- SAAR for 3 stations on the French section of the Saar (Service de la Navigation de Strasbourg);
- RHEINA for several stations on the Upper Rhine and on the Neckar (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz);
- MKF for several stations in the Rhine basin (Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz);
- LOBITH for the station Lobith/Rhine (Rijkswaterstaat, Lelystad).

The subsequent evaluation of questionnaires (chapter 2) allows a comprehensive comparison of the model structure, the forecasting objective and the required data for calibration and operation.

Chapter 3 describes the historical development of water-level and discharge forecasting from the first beginning with the Sumerians and the Egyptians till the present. Particularly impressive are the achievements of meteorologists and hydrologists of a number of Central-European countries in establishing gauging stations and developing data communication systems. These systems go back as far as the end of the 18th century. This historical review indicates that the above-mentioned forecasting models conclude, for the time being, a long and intensive effort to recognize in time, and so diminish, the dangers caused by floods.

Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van de meteorologische omstandigheden van augustus 1978 en januari/februari 1980, die aanzienlijke hoogwatergolven in het Rijngebied veroorzaakten. Daarbij werden de bovengenoemde 7 modellen toegepast voor de voorspelling van waterstanden en afvoeren respectievelijk voor de bepaling achteraf van de afvoerverlooptijden voor deze hoogwaterperioden.

Een uitgebreide beschrijving van alle modellen volgt in hoofdstuk 5.

Het model RHEINFELDEN wordt in Zwitserland met goed gevolg gebruikt voor zowel lange- als korte-termijn-voorspellingen voor het gelijknamige station. De voorspelling voor korte termijn heeft betrekking op de twee volgende dagen. De voorspellingen voor lange termijn gelden in het winterhalfjaar voor één en voor twee maanden, in het zomerhalfjaar voor alle perioden van meerdere maanden die met de lopende maand beginnen en uiterlijk met september eindigen. De voorspellingen zijn gebaseerd op de waargenomen afvoerwaarden, neerslagcijfers, luchttemperaturen en sneeuwhoogten van de voorafgaande periode, alsmede op kwantitatieve voorspellingen van neerslag en temperatuur.

In Frankrijk bestaan momenteel drie modellen:

Het model ILL is ontwikkeld ten behoeve van korte-termijn-voorspellingen, teneinde tegemoet te komen aan een verzoek van Duitse zijde betreffende de voorspelling van Rijnafvoeren. De voorspelling geldt voor 6, 12, 18 en 24 uur. Als invoergegevens worden voor de 6 en 12 uur voorspellingen uitsluitend afvoerwaarden gebruikt. De andere twee voorspellingen zijn, naast afvoerwaarden, ook gebaseerd op gegevens van neerslag en het smelten van sneeuw.

De voorspellingsmodellen MOEZEL, die in 1978 voor het stroomgebied van de Franse Moezel werden ontwikkeld, bleken tijdens de hoogwaterperioden van 1982 en 1983 grote gebreken te vertonen. Deze modellen worden dan ook momenteel herzien. Doel van de herziening is de ontwikkeling van autoregressieve modellen, waarin de gegevens van het betreffende station zelf en van enkele meetstations stroomopwaarts worden gebruikt. Het gaat hier om voorspellingen voor korte termijn, die betrekking hebben op de volgende 24 uur, voor zes Franse Moezelstations.

Het model SAAR is een stochastisch model waarmee aan de hand van afvoer- en neerslaggegevens van stroomopwaarts gelegen meetstations voorspellingen voor korte termijn worden gedaan die betrekking hebben op de volgende 6 en 12 uur. Vanwege het ontbreken van basisgegevens is het model niet operationeel.

The meteorological conditions in August 1978 and January/February 1980, leading to marked peak flow flood waves in the Rhine basin, are described in chapter 4. In this case the above-mentioned models were used for level and discharge forecasting, or, afterwards, for calculating the hydrographs.

A detailed description of all models is given in chapter 5.

The model RHEINFELDEN, in use in Switzerland, is employed successfully for short-term as well as for long-term forecasts at the station of the same name. The short-term forecast covers in the winter half-year one and two months, and in the summer half-year all periods of several months starting with the current month and ending not later than the end of September. The forecasting is based on recorded discharges, precipitation totals, air-temperatures and snow depths in the preceding period, as well as on quantitative forecasts of precipitation and temperature.

In France three models are presently available:

The model ILL was developed for short-term forecasting, to comply with a German request concerning the forecasting of discharge rates of the Rhine. It results in forecasts for 6, 12, 18 and 24 hours in advance. The forecasts for 6 and 12 hours are based exclusively on discharge values. The other two forecasts use precipitation and snow-melting data next to discharge values.

The forecasting models MOSELLE, which were developed in 1978 for the basin of the French Moselle, proved to be defective during the floods of 1982 and 1983. Consequently, these models are currently being revised. Purpose of this revision is to develop autoregressive models, which use data of the station concerned and of a few other gauging stations located upstream. Short-term forecasts, extending up to 24 hours, will be made for six stations on the French section of the Moselle.

The model SAAR is a stochastic model producing short-term forecasts for 6 and 12 hour periods, based on discharge rates and precipitation quantities at gauging stations located upstream. Owing to a lack of basic data, the model is not operational.

In de Bondsrepubliek Duitsland worden voor het Rijngebied twee voorspellingsmodellen gebruikt:

Het model RHEINA is een deterministisch neerslag-afvoer-model, dat voornamelijk ten behoeve van de scheepvaart is ontwikkeld. Er worden voorspellingen voor de twee volgende dagen gegeven.

Het model MKF is speciaal t.b.v. de laagwatervoorspellingen voor het station Kaub ontwikkeld. Naderhand werd het ook t.b.v. hoogwatervoorspellingen voor verscheidene meetstations aan de Rijn gebruikt. Het model berust op overbrengingsfuncties tussen stations en behoeft als invoergegevens uitsluitend afvoerwaarden. De voorspellingen hebben betrekking op de volgende 18 uur.

In Nederland wordt de afvoer voor het station Lobith aan de hand van het model LOBITH voorspeld. Dit is een stochastisch model dat werkt met dagelijkse waterstanden en neerslagcijfers alsmede met prognoses van afvoeren en neerslagen. Voorspellingen worden voor ten hoogste 4 dagen vooruit gedaan.

Duidelijk blijkt dat gebruik wordt gemaakt van wiskundige algoritmes die allen zeer verschillend maar toch evenzeer bruikbaar zijn. De modellen RHEINFELDEN, RHEINA en voor een deel ook LOBITH gebruiken voornamelijk conceptuele vergelijkingen terwijl de overige modellen op stochastische vergelijking zijn gebaseerd.

Ten slotte wordt in bijlage II de aandacht gevestigd op een project van de hydrologische werkgroep RA-VI van de WMO, waarin een overzicht werd gegeven van talrijke voorspellingsmodellen die in Europa in gebruik zijn. Voor wat betreft het Rijngebied zijn de modellen RHEINFELDEN, MKF en LOBITH hierin opgenomen. Daarnaast staan er ook andere voorspellingsmodellen in: Rheinfelden (lange-termijnvoorspelling), Raunheim/Main en Niederrhein (stations Koblenz en Ruhrort). De bijlage verschaft in wezen geen nieuwe informatie. Aangezien het een WMO-document betreft, zijn de WMO-voertalen Engels en Frans gehandhaafd.

In the Federal Republic of Germany two forecasting models are utilized for the Rhine basin:

The model RHEINA is a deterministic precipitation-discharge model, developed mainly for navigation. Forecasts extend to two days.

The model MKF was developed specifically for low stage forecasting at the Kaub station. Later on it has also been used for flood forecasting at several Rhine stations. The model is based on transfer functions between stations and only requires discharge values as entries. The forecasting period extends to 18 hours.

In the Netherlands the discharge at the Lobith station is forecast with the model LOBITH. This is a stochastic model, using daily water-levels and precipitation quantities, as well as discharge and precipitation prognoses. The forecasts are prepared for a maximum of 4 days in advance.

It is clear that mathematical algorithms are used, which, although considerably different, are equally usable. The models RHEINFELDEN, RHEINA and partly also LOBITH use mainly conceptual equations, while the remaining models are based on stochastic relations.

Finally appendix II calls attention to a project of the hydrological WMO working group RA-VI, covering numerous forecasting models in the European area. For the Rhine basin the models RHEINFELDEN, MKF and LOBITH are included. Other forecasting models are mentioned as well: Rheinfelden (long-term forecast), Raunheim/Main and Lower Rhine (Koblenz and Kaub stations). In fact the appendix does not supply any new information. As it concerns a WMO document, the official languages of this organization, English and French, have been maintained.

Chapitre 3/Kapitel 3

- RIJKSWATERSTAAT (1951): Algemene instructie voor de ambtenaren van de Rijkswaterstaat belast met de zorg voor de Buitengewone Riviercorrespondentie bedoeld bij §17 van de Waterstaatswet 1900, 's-Gravenhage.
- BELGRAND, F. (1873): La Seine, étude hydraulique, Paris.
- DVWK (1980): Operationelle Wasserstands- und Abflußvorhersagen. Vorträge zum Kolloquium am 21. und 22. November 1979 in Bad Nauheim (zusammengestellt von H.G. Mendel). Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau, H. 51. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- DVWK-FACHAUSSCHUß WASSERSTANDS- UND ABFLUßVORHERSAGE (1981): Literatursammlung Wasserstands- und Abflußvorhersage, Koblenz.
- EAST CHINA COLLEGE OF HYDRAULIC ENGINEERING (1977): Flood forecasting method for humid regions of China. Nanking, China, 166 p.
- ECKOLDT, M. (1970): Die Anfänge der Hydrometrie in Deutschland. Dt. Gewässerk. Mitt. 14, H. 4, S. 82-91.
- ENGEL, H.; MENDEL, H.G. (1979): Die Wellentransformation als Teilmodell eines Vorhersagesystems. 10. Konferenz der Donauländer über hydrologische Vorhersagen, Wien.
- ESCHWEILER, W. (1953): Hochwasservorhersage am Rhein. Deutsche Berichte zum 18. internationalen Schifffahrtskongreß, Bonn.
- GABRECHT, G. et al. (1984): Geschichte der Hydrologie. Tagung, Koblenz, 11. – 12. Mai 1984. Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch Nr. 45, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- GREBNER, D. (1982): Prévisions objectives et quantitatives des précipitations dans le bassin du Rhin. Etat de la question en 1982/Objektive, quantitative Niederschlagsvorhersagen im Rheingebiet. Stand 1982. Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin/Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Den Haag. Rapport/Bericht Nr. I-1, 47 S.
- HUTHMANN, G. (1975): Short-term forecasting of streamflow with the aid of multiple response functions, IAHS-AISH publ. Nr. 115, pp. 115-121.
- HUTHMANN, G. (1982): Die Anwendung der multiplen Frequenz-Response-Analyse zur Hochwasservorhersage an ausgebauten großen Gewässern. Verlag Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten, 242 S.
- HUTHMANN, G.; WILKE, K. (1982): Time and frequency domain analysis of hydrological systems. Journal of Hydrology, 55, pp. 347-369.
- ITTERSUM, F.A.R.A. VAN (1906): De Lekdijk benedendams en de IJsseldam, derde deel 1875-1905, Utrecht.
- JENSEN, H. (1979): Abflußvorhersagen in der Schweiz. In: Operationelle Wasserstands- und Abflußvorhersagen. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau, H. 51. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- KELBER, W. (1980): Wasserstandsvorhersagen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Schriftenreihe des DVWK, H. 51, S. 141-151, Verlag Paul Parey, Hamburg.
- KELLER, H. (1901): Weser und Ems, ihre Stromgebiete und ihre wichtigen Nebenflüsse. Bd. III (Die Weser von Münden bis Geestemünde), Berlin.
- KRESSER, W. (1979): Zur Geschichte der hydrologischen Vorhersagen im Donaauraum. Österreichische Wasserwirtschaft, 32, H. 11/12, S. 238-251.

- LANDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE IM MINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, DOMÄNEN UND FORSTEN (1928): Gutachten über die Ausführung der Hoch- und Niedrigwasservoraussage am Rhein, Berlin.
- LANG, H.; JENSEN, H.; GREBNER, D. (1987): Short-range runoff forecasting for the River Rhine at Rheinfelden: experiences and present problems. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 32, No. 3, pp. 385-397, Oxford.
- LIEBSCHER, H.-J. (1984): Geschichte des Wasserstands- und Abflußvorhersagen. *Besondere Mitteilungen zum Deutschen Gewässerkundlichen Jahrbuch Nr. 45*, S. 185-210, Koblenz.
- LORTET, D. (1849): Notice sur la Commission hydrométrique de Lyon. *Annuaire météorologique de la France*, p. 363-368.
- LUGIEZ, F.; KASSER, P.; JENSEN, H.; GUILLOT, P. (1969): La prévision des débits du Rhin. *La Houille Blanche*, N° 7, p. 733-746.
- LUGIEZ, F.; KASSER, P.; JENSEN, H.; GUILLOT, P. (1969): La prévision des débits du Rhin. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, 14, pp. 91-116.
- MAAB, A. (1881): Über die Vorausberechnung des Wasserstandes der Ströme, insbesondere des Wasserstandes der Elbe bei Barby. *Zeitschr. für Bauwesen* 31, S. 25-34, Berlin.
- MADE, J.W. VAN DER (1982): Analyse quantitative des débits/Quantitative Analyse der Abflüsse. *Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin/Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes*, Den Haag. Rapport/Bericht Nr. II-1, 85 S.
- MAZEL, J.Z. (1886): De verdediging der rivierdijken bij ijsgang en hoog opperwater, Leiden.
- MEER, Z.Y. VAN DER (1934): Hoogwatervoorspelling voor de Nederlandse rivieren. *Intern Rapport Rijkswaterstaat Algemene Dienst*.
- MENDEL, H.G. (1976): Operationelle Methoden zur Wasserstandsvorhersage, *Wasserkalender 1977*, S. 41-64, Verlag Erich Schmidt, Berlin, Bielefeld und München.
- MENDEL, H.G. (1980): Abflußvorhersagen der Bundesanstalt für Gewässerkunde für Pegel im Einzugsgebiet des Rheins. *Schriftenreihe des DVWK*, H. 51, S. 152-175, Verlag Paul Parey, Hamburg.
- MENDEL, H.G. (1984): Das deterministische Modell RHEINA der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz (unveröffentlicht).
- MONSONYI, E. (1974): Bedeutung hydrologischer Prognosen für die Bewirtschaftung des Wassers. *Mitt. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich*, Nr. 12, S. 7-65.
- PETIT, J.P.A.M. (1931): Hoogwatervoorspelling op de Waal, den Rijn en de IJssel. *Waterschapsbelangen*.
- RONDE, J.G. DE (1984): The forecastings and warning systems of Rijkswaterstaat for the river Rhine, *Real time flow forecasting. Agricultural University Wageningen*, report 6.
- RUNDO, A. (1940): Die hydrologischen Instituten der europäischen Länder, deren Organisation und Tätigkeit. *Wasserkraft Jahrbuch 1929/30*, München.
- SCHWEIZER METEOROLOGISCHE ZENTRALANSTALT (1932): Versuch einer Vorhersage rascher Pegelstandsänderungen des Rheinstroms bei Basel aufgrund der Niederschlagsbeträge im Einzugsgebiet. *Schweizerische Wasser- und Energiewirtschaft*, 24, H. 7, S. 65-69, H. 8, S. 73-76.
- TEUBER, W. (1970): Kontinuierliche Abflußvorhersagen mittels mehrfacher linearer Regression. *Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts der TU, Braunschweig*.

- TEUBER, W. (1970): Kontinuierliche Hochwasservorhersagen mit mehrfach linearen Pegelbeziehungen. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 11. Jg., S. 53-59.
- VISCHER, D.; JENSEN, H. (1978): Langfristprognosen für den Rheinabfluß bei Rheinfeldern. Wasserwirtschaft, 68. Jg., H. 9.
- VISCHER, D.; JENSEN, H. (1981): Abflußprognosen am Beispiel des Rheins bei Rheinfeldern. In: Beschaffung hydrologischer Unterlagen in der Schweiz, Mitt. Landeshydrologie, Nr. 3, S. 1-16.
- VOW (1938): Verslag aan de Koningin over de openbare werken in het jaar 1937. 's-Gravenhage.
- WALLNER, J. (1938): Die Hochwasservoraussage. Springer Verlag, Berlin.
- WALLNER, J. (1938): Stand der Hochwasservoraussage und Vorschläge für die weitere Entwicklung. Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 33, München.
- WELCKER, J.W. (1880): De Noorder-Lekdijk Bovendams en de doorsteking van den Zuider-Lekdijk bij Culemborg 1803-1813. 's-Gravenhage.
- WEMELSFELDER, P.J. (1953): Daily stage forecasting of the Rhine. XVIIIth International Navigation Congress, Rome.
- WEMELSFELDER, P.J. (1972): Fighting floods and storm surges in the Netherlands. Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, N. 169.
- WILKE, K. (1975): Mehrkanalfilterung als Prognoseverfahren. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 1975, Band I, S. 229-240, Innsbruck.
- WILKE, K. (1975): Principles of hydrological forecasting by multichannel Wiener filtering. Proceedings of the Bratislava Symposium on Mathematical Models in Hydrology and Water Resources Systems, IAHS-AISH Publ. No. 115, pp. 257-264.
- WILKE, K. (1984): Kurzfristige Wasserstands- und Abflußvorhersage am Rhein unter Anwendung ausgewählter mathematischer Verfahren. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau, H. 65, Verlag Paul Parey, Hamburg.
- WILKE, K. (1985): Hochwasservorhersage. Wasserbau-Mitteilungen der Technischen Hochschule Darmstadt, Nr. 24, S. 117-128.
- WITTENBERG, H. (1976): Hochwasservorhersage aus den Beobachtungen der Oberliegerpegel durch mehrfach lineare Systemübertragung. Wasser und Boden, Band 10.
- WMO (1969): Hydrological forecasting. T.N. No. 92, Geneva.
- WMO (1973): Benefit and cost analysis of hydrological forecast. A state-of-the-art report. Operational Hydrology Report, No. 3, Geneva.
- WMO (1975): Intercomparison of conceptual models used in operational hydrological forecasting. Operational Hydrology Report, No. 7, Geneva.
- ZENTRALBÜRO FÜR METEOROLOGIE UND HYDROGRAPHIE IM GROSßHERZOGTUM BADEN (Hrsg.) (1908): Ergebnisse der Untersuchung der Hochwasserverhältnisse im deutschen Rheingebiet. VIII. Heft. Der Abflußvorgang im Rhein unter der wechselnden Wasserlieferung des Stromgebietes und die Vorhersagebestimmung der Rheinstände. Verlag W. Ernst, Berlin.
- DESCOMBES, R. (1976): L'annonce des crues de la Sarre. Compte Rendu des Journées Problèmes de l'eau. Pont à Mousson.

Chapitre 4/Kapitel 4

GREBNER, D. (1980): Starkregensituation vom 7./8. August 1978 im Schweizer Alpenraum; Entwicklung, Bewertung und Vorhersagbarkeit. Tagungspublikation »Interprävent 1980«, Bad Ischl, Bd. 1, S. 215-224.

Chapitre 5/Kapitel 5

ENGEL, H.; MENDEL, H.G. (1979): Die Wellentransformation als Teilmodell eines Vorhersagesystems. X. Konferenz der Donauländer, S. 3/1 – 3/9, Wien.

CEMAGREF ANTONY (1985): Prévisions des crues de l'Ill. Rapport d'étude (2ème phase, 1ère et 2ème partie). Lyon.

GREBNER, D.; JENSEN, H. (1979): Der räumlich-zeitliche Ablauf von Niederschlagsfeldern im schweizerischen Rheingebiet. Festschrift Peter Kasser, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH-Zürich, Nr. 41.

HOCHWASSERSTUDIENKOMMISSION FÜR DEN RHEIN/COMMISSION D'ÉTUDE DES CRUES DU RHIN (1978): Schlußbericht/Rapport final.

JENSEN, H. (1979): Statistische Untersuchung der Beziehungen zwischen den Schneereserven und dem Sommerabfluß alpiner Gebiete. Festschrift Peter Kasser, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH-Zürich, Nr. 41.

MENDEL, H.G. (1979): Zur Berechnung von Gebietsniederschlägen aus Punktmessungen. Festschrift Peter Kasser, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH-Zürich, Nr. 41.

MENDEL, H.G. (1980): Abflußvorhersagen der Bundesanstalt für Gewässerkunde für Pegel im Einzugsgebiet des Rheins. Schriftenreihe des DVWK, H. 51, S. 152-175.

KELBER, W. (1980): Wasserstandsvorhersagen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Schriftenreihe des DVWK, H. 51, S. 141-151.

LEVIANDIER, TH. (1977): Prévision à court terme des débits journaliers de l'Ill (2ième partie) – note C.T.G.R.E.F. ANTONY (Division Hydrologie) S.R.A.E. ALSACE.


LEVIANDIER, TH. (1979): Prévision des crues de l'Ill à Colmar – Rapport C.T.G.R.E.F. ANTONY (Division Hydrologie)/S.R.A.E. ALSACE/D.D.A. du Haut-Rhin.

VISCHER, D.; JENSEN, H. (1978): Langfristprognosen für den Rheinabfluß in Rheinfeldern. Wasserwirtschaft, Jg. 68, H. 9.

LEGENDE

ANNEXE 1

ANLAGE 1

Modèle/Modell	 Centre de prévision/ Vorhersagezentrale	Stations pour lesquelles la prévision est faite/ Pegel für denen die Vorhersage erstellt wird
Rheinfelden	Berne/Bern	✕
III	Colmar	┌
Moselle/Mosel	Nancy	└
Sarre/Saar	Strasbourg/Strassburg	↑
MKF	Coblence/Koblenz	•
RHEINA	Coblence/Koblenz	○
Lobith	La Haye/Den Haag	□



RIJKSWATERSTAAT
 MEETKUNDIGE DIENST
 AFD. WATERSTAATSKARTOGRAFIE DEN HAAG NL
 © CHR/KHR 1986 1988

TABLEAU DU GROUPE DE TRAVAIL RA-VI DE L'OMM
TABELLE DER HYDROLOGISCHEN ARBEITSGRUPPE RA-VI DER WMO

ANNEXE II
ANLAGE II

1. COUNTRY Basin/Reach	FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY Rhein/Niederrhein	FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY Rhein/Kaub
2. Area km ²	159.800	103729
PRECIPITATION		
3. Mean annual	900	1030
4. Record (yrs.)	50	90
DISCHARGE		
5. Mean annual	2200-2500	1630
6. Max. observed	11000-12000	6700
7. Min. observed	520-600	482
8. Record (yrs.)	165	135
9. River Works	river regulation	
HYDROLOGICAL FORECASTING SYSTEM IN THE BASIN		
10. Operational since	1930	
11. Purpose of forecast	flood control warning	navigation
12. Forecasted elements	surface levels	surface levels, discharge
13. Forecast output	time of occurrence	means
14. Period covered	24 to 48 hours	3 days
15. Forecasting operation	water level 550 cm at gauge Koblenz or 850 cm at gauge Ruhrort	all the year
16. Forecasting methods/model	empirical ¹	statistical ¹
17. Computation aids	graphs	programmable computer for actual forecasts: digital computer DIETZ, System Minical 621, 20kByte, 1 disk For computation of parameters, IBM 370-165, 270kByte, 1 tape
DATA COLLECTION AND TRANSMISSION		
18. Data needed	water level	water level, discharge
19. Forecasted data input	water level	discharge
20. Data collection	manual	manual, automatic
21. Data transmission	telephone	telephone, telex
22. Transfer of technology		
23. Publications	Eschweiler, W.: Entwicklung und Bedeutung des Pegelwesens am Rhein, in Deutsche Wasserwirtschaft 1952 Sonderheft Vorträge der gewässerkundlichen Tagung 1951 in Hamburg	Wilke, K.: Principles of hydrological forecasting by multichannel Wiener filtering, Proceedings of Mathematical Models in Hydrology and Water Resources Systems, IAHS-AISH Publ. 115, pp. 257-264, 1975
NOTES	¹ Graphische Addition der um die Laufzeit zu den Vorhersagepegeln gegeneinander verschobenen Abflußganglinien der oberhalb der Vorhersagepegel liegenden Bezugspegel	¹ Special correlation analysis, the so-called multichannel Wiener filtering method for linear and time-invariant systems

1. COUNTRY Basin/Reach	FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY Rhine/Koblenz	FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY Main/Raunheim
2. Area km ²	110.075	27.142
PRECIPITATION		
3. Mean annual	990	746
4. Record (yrs.)	90	31
DISCHARGE		
5. Mean annual	1680	180
6. Max. observed	7500	2500
7. Min. observed	510	9
8. Record (yrs.)	163	158
9. River Works		
HYDROLOGICAL FORECASTING SYSTEM IN THE BASIN		
10. Operational since	1980	
11. Purpose of forecast	flood control warning	flood control warning, navigation, ice problems
12. Forecasted elements	surface levels	surface levels, runoff volume, ice
13. Forecast output	every 6 hours time occurrence	max. values, daily occurrence time
14. Period covered	up to 24 hours	up to 24 hours
15. Forecasting operation	if the surface level > 400 cm	if the surface level > 370 cm
16. Forecasting methods/model	statistical ¹	empirical
17. Computation aids	programmable computer for actual forecasts: digital computer DIETZ, System Minical 621, 20kByte, 1 disk. For computation of parameters, IBM 370-165, 270kByte, 1 tape	graphs, manual & tabular computation
DATA COLLECTION AND TRANSMISSION		
18. Data needed	water level	air temp., water level, water temp.
19. Forecasted data input	water level	water level, discharge
20. Data collection	manual, automatic	manual, recorded
21. Data transmission	telephone, telex	telephon
22. Transfer of technology		
23. Publications	Wilke, K.: Principles of hydrological fore- casting by multichannel Wiener filtering, Proceedings of Mathematical Models in Hydrology and Water Resources Systems, IAHS-AISH Publ. 115, pp. 257-264, 1975	
NOTES	¹ Special correlation analysis, the so-called multichannel Wiener filtering method for linear and time-invariant systems	

1. COUNTRY Basin/Reach	NETHERLANDS Rhine/Lobith	NETHERLANDS Rhine/Lobith
2. Area km ²	160.800	160.800
PRECIPITATION		
3. Mean annual		
4. Record (yrs.)		
DISCHARGE		
5. Mean annual	2200	2200
6. Max. observed	13000	13000
7. Min. observed	620	620
8. Record (yrs.)	80	80
9. River Works		
HYDROLOGICAL FORECASTING SYSTEM IN THE BASIN		
10. Operational since	1952	1981
11. Purpose of forecast	flood control warning	flood control warning
12. Forecasted elements	discharge	surface levels
13. Forecast output	every 24 hours	every 24 hours up to 4 days ahead
14. Period covered		4 days
15. Forecasting operation	all year since 1978	all year
16. Forecasting methods/model	empirical	statistical, multiple linear regression with an autoregressive part
17. Computation aids	manual and tabular computation	programmable computer, actual forecast: HP 9835, 126kByte, 1 disc; for computation of parameters: Univac 1100 2 Megabyte, 30 discs
DATA COLLECTION AND TRANSMISSION		
18. Data needed	water level, discharge	water level
19. Forecasted data input	water level, discharge	water level
20. Data collection	manual	manual, automatic
21. Data transmission	telephone	telephone, telex
22. Transfer of technology		yes, if enough data are available
23. Publications	Congrès International de Navigation Rome, Section I Navigation Intérieure 1953 Wemelsfelder, P.J.: Daily stage forecasting of the Rhine	not yet available

1. COUNTRY Basin/Reach	SWITZERLAND Rhin/Rheinfelden	SWITZERLAND Rhin/Rheinfelden
2. Area km ²	34.550	34.550
PRECIPITATION		
3. Mean annual		
4. Record (yrs.)		
DISCHARGE		
5. Mean annual	1021	1021
6. Max. observed	3850	3850
7. Min. observed	315	315
8. Record (yrs.)	82	82
9. River Works		
HYDROLOGICAL FORECASTING SYSTEM IN THE BASIN		
10. Operational since		
11. Purpose of forecast	lutte contre les inondations et avis de crue, énergie/ centrales hydro-électriques	énergie/centrales hydro-électriques
12. Forecasted elements	débits, précipitations, températures	volume d'eau écoulée
13. Forecast output	enregistrements continus, moyennes, tous les jours	moyennes, fréquence mensuelle
14. Period covered	2 jours	1 à 8 mois
15. Forecasting operation	toute l'année	toute l'année saisonnier
16. Forecasting methods/model	statistique: modèle de processus auto- régressif et régressif déterministe: modèle précip. débits ¹	statistique: analyse de régression
17. Computation aids	ordinateur programmable, CDC 6500, CYBER 174	ordinateur programmable, HP 9830
DATA COLLECTION AND TRANSMISSION		
18. Data needed	voir note ²	voir note ¹
19. Forecasted data input	précipitation, température de l'air, débit	
20. Data collection	automatique (réseaux Institut Météorologie Suisse, Service Hydrologique National)	manuel, autographique, automatique
21. Data transmission	téléphone, télex	poste, téléphone
22. Transfer of technology		
23. Publications	Jensen, H.: Abflußvorhersagen in der Schweiz, Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbaubau, Heft 51, 1980	1. Fischer, D.; Jensen, H.: Langfrist- prognosen für den Rheinabfluß in Rheinfelden. Wasserwirtschaft, Jg. 68, Heft 9, 1978. 2. Jensen, H.: Statistische Untersuchungen der Beziehungen zwischen den Schnee- reserven und der Sommerabfluß alpiner Gebiete. Mitteilung Nr. 41 der Ver- suchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH-Zürich, 1979
NOTES		
	¹ combinée	¹ précipitations, épaisseur, équivalent en eau et étendue de la couche de neige, tem- pérature de l'air, débit
	² précipitations, épaisseur, équivalent en eau et étendue de la couche de neige, tem- pérature de l'air, débit	

CHR/KHR (1978): Le bassin du Rhin, Monographie Hydrologique. Staatsuitgeverij, La Haye/
Das Rheingebiet. Hydrologische Monographie. Staatsuitgeverij, Den Haag. ISBN 9012017750

Rapports de la CHR**Berichte der KHR**

- I-1 GREBNER, D. (1982): Prévisions objectives et quantitatives des précipitations dans le bassin du Rhin. Etat de la question en 1982 (édition épuisée)/
Objektive quantitative Niederschlagsvorhersagen im Rheingebiet. Stand 1982 (nicht mehr lieferbar)
- I-2 GERHARD, H.; MADE, J.W. VAN DER; REIFF, J.; VREES, L.P.M. DE (1983): La sécheresse et les basses eaux de 1976. (2ème édition, 1985)/
Die Trocken- und Niedrigwasserperiode 1976. (2. Auflage, 1985). ISBN 9070980010
- I-3 HOFIUS, K. (1985): Bassins de recherches hydrologiques dans le bassin du Rhin/
Hydrologische Untersuchungsgebiete im Rheingebiet. ISBN 9070980029
- I-4 BUCK, W.; KIPGEN, R.; MADE, J.W. VAN DER; MONTMOLLIN, F. DE; ZETTL, H.; ZUMSTEIN, J.F. (1986): Estimation des probabilités de crues et d'étiages dans le bassin du Rhin/
Berechnung von Hoch- und Niedrigwasserwahrscheinlichkeit im Rheingebiet. ISBN 9070980037
- I-5 TEUBER, W.; VERAART, A.J. (1986): La détermination des débits du Rhin dans la région frontalière germano-hollandaise/
Abflußermittlung am Rhein im deutsch-niederländischen Grenzbereich. ISBN 9070980045
- I-6 TEUBER, W. (1987): Influence de l'étalonnage des moulinets hydrométriques sur l'incertitude des déterminations de débit. Résultats d'une étude comparative/
Einfluß der Kalibrierung hydrometrischer Meßflügel auf die Unsicherheit der Abflußermittlung. Ergebnisse eines Ringversuchs. ISBN 9070980053.
- I-7 MENDEL, H.G. (1988): Description de modèles de prévision hydrologiques dans le bassin du Rhin/
Beschreibung hydrologischer Vorhersagemodelle im Rheineinzugsgebiet. ISBN 9070980061.

Rapports sous l'égide de la CHR**Berichte unter der Schirmherrschaft der KHR**

- II-1 MADE, J.W. VAN DER (1982): Analyse quantitative des débits (édition épuisée)/
Quantitative Analyse der Abflüsse (nicht mehr lieferbar).

Quelques informations sur la:

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'HYDROLOGIE DU BASSIN DU RHIN (CHR)

Institution

1970 A la suite de la coopération des comités nationaux pour le PHI dans le cadre de la coopération régionale du programme de l'UNESCO de la Décennie Hydrologique Internationale (DHI).

1975 Poursuite des travaux dans le cadre du Programme Hydrologique International (PHI) de l'UNESCO et du Programme d'Hydrologie Opérationnelle (PHO) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

1978 Appui des travaux de la Commission par l'échange d'une note verbale par l'intermédiaire des Ministères des affaires étrangères des pays concernés.

Pays participants

la Suisse, l'Autriche, la République fédérale d'Allemagne, la France, le Luxembourg, les Pays-Bas.

Langues de travail

français et allemand

Tâches

- Encourager la coopération des instituts hydrologiques scientifiques et des services hydrologiques dans le bassin du Rhin.
- Faciliter l'échange de données et d'informations dans le bassin du Rhin (par exemple données actuelles et prévisions).
- Harmoniser les données de base dans le bassin du Rhin.
- Echange des résultats de recherches hydrologiques scientifiques dans le bassin du Rhin.

Organes de la Commission

Représentants permanents (séances 2 fois par an)

Comité de rédaction

Groupes de travail

Groupes de concertation

Rapporteurs

Travaux effectués

Monographie hydrologique volumineuse sur le bassin du Rhin.

Publications de rapports des groupes de travail, des rapporteurs («série I») et des auteurs individuels («série II») – voir p. 131.

Einige Informationen über die:

INTERNATIONALE KOMMISSION FÜR DIE HYDROLOGIE DES RHEINGEBIETES (KHR)

Gründung

1970 Durch regionale Zusammenarbeit der IHD-Nationalkomitees im Rahmen der Internationalen Hydrologischen Dekade (IHD) der UNESCO.

1975 Fortsetzung der Arbeiten im Rahmen des Internationalen Hydrologischen Programms (IHP) der UNESCO und des Operationellen Hydrologischen Programms (OHP) der WMO.

1978 Unterstützung der Arbeiten der Kommission durch Austausch einer Verbal-Note über die Ministerien für auswärtige Angelegenheiten der mitarbeitenden Länder.

Mitarbeitende Länder

Schweiz, Österreich, Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Luxemburg, Niederlande.

Arbeits Sprachen

Französisch und Deutsch

Aufgaben

- Förderung der Zusammenarbeit der wissenschaftlichen hydrologischen Institute und der hydrologischen Dienste im Rheingebiet.
- Erleichterung des Daten- und Informationsaustausches im Rheingebiet (z.B. aktuelle Daten, Vorhersagen).
- Vereinheitlichung der Datengrundlagen im Rheingebiet.
- Austausch von hydrologischen Forschungsergebnissen im Rheingebiet.

Arbeitsgremien

Ständige Vertreter (Sitzungen 2 mal pro Jahr)

Redaktionsausschuß

Arbeitsgruppen

Kontaktgruppen

Rapporteurs

Arbeitsergebnisse

Umfangreiche Monographie über das Rheingebiet.

Publikationen der Arbeitsgruppen, der Rapporteurs («Serie I») und von individuellen Autoren («Serie II») – siehe S. 131.

Groupes de travail et leurs tâches

»Standardisation«:

- Harmonisation des mesures de débits au niveau des tronçons frontaliers du Rhin et de ses affluents.
- Sélection d'un réseau de mesure en vue d'une description représentative de la situation hydrologique dans le bassin du Rhin et d'une description uniforme des stations de mesure.
- Sélection de paramètres hydrologiques caractéristiques.
- Etablissement d'un aperçu des stations de mesure importantes dans le bassin du Rhin.

»Temps d'écoulement«:

- Détermination des temps d'écoulement et des temps de séjour du Rhin (en coopération avec la CIPR).

Rapporteurs et leurs tâches

»Précipitations régionales«:

- Description des méthodes utilisées dans le bassin du Rhin.
- Propositions concernant l'échange continu des valeurs de précipitations régionales.

»Bibliographie«:

- Recueil de la bibliographie hydrologique sur le bassin du Rhin du 1970 au 1980.

»Actualisation de la Monographie«:

- Aperçu des données hydrologiques sur la période 1971-1980 (suite à tome B de la Monographie).

»Changements dans le régime des débits«:

- Description des influences d'origine humaine sur le cours et le transport d'eau du Rhin.

»Evénements hydrologiques exceptionnels«:

- Crues de 1983 sur le Rhin et la Moselle.
- Crue de 1987 sur le Rhin.

Arbeitsgruppen und ihre Aufgaben

»Standardisierung«:

- Abstimmung der Abflußermittlung in Grenzabschnitten des Rheins und seiner Nebenflüssen.
- Auswahl eines Meßnetzes zur repräsentativen Beschreibung der hydrologischen Situation im Rheingebiet mit einheitlicher Meßstellenbeschreibung.
- Auswahl von charakteristischen hydrologischen Parametern.
- Erstellen einer Übersicht über wichtige Meßstellen im Rheingebiet.

»Fließzeiten«:

- Ermitteln von Fließzeiten und Aufenthaltsdauern im Rhein (in Zusammenarbeit mit der IKSR).

Rapporteure und ihre Aufgaben

»Gebietsniederschläge«:

- Zusammenstellung der im Rheingebiet angewandten Methoden.
- Vorschläge für aktuellen Austausch von Gebietsniederschlagsdaten.

»Bibliographie«:

- Zusammenstellung der hydrologischen Literatur über das Rheingebiet von 1970 bis 1980.

»Fortschreibung der Monographie«:

- Übersicht hydrologischer Daten über die Periode 1971-1980 (Fortschreibung von Teil B der Monographie).

»Änderungen im Abflußregime«:

- Beschreibung der anthropogenen Einflüsse auf den Lauf und die Wasserführung des Rheines.

»Außergewöhnliche hydrologische Ereignisse«:

- Die Hochwasser von 1983 an Rhein und Mosel.
- Das Hochwasser von 1987 am Rhein.

Enige gegevens betreffende de:

INTERNATIONALE COMMISSIE VOOR DE HYDROLOGIE VAN HET RIJNGEBIED (CHR)

Oprichting

1970 In het kader van het Internationaal Hydrologisch Decennium (IHD) van de UNESCO, door samenwerking tussen de betreffende nationale comités.

1975 Voortzetting der werkzaamheden in het kader van het Internationaal Hydrologisch Programma (IHP) van de UNESCO en het Operationeel Hydrologisch Programma (OHP) van de WMO.

1978 Ondersteuning van het werk der Commissie door een nota-uitwisseling tussen de ministeries van buitenlandse zaken van de samenwerkende landen.

Deelnemende landen

Zwitserland, Oostenrijk, Bondsrepubliek Duitsland, Frankrijk, Luxemburg, Nederland.

Voertalen

Frans en Duits.

Taken

- Bevorderen van de samenwerking tussen de wetenschappelijke hydrologische instituten en diensten in het stroomgebied van de Rijn.
- Bevorderen van gegevens- en informatieuitwisseling in het stroomgebied van de Rijn (b.v. actuele gegevens, voorspelling).
- Standaardisering van gegevensbestanden in de Rijn-oeverstaten.
- Uitwisseling van hydrologische onderzoeksresultaten m.b.t. het stroomgebied van de Rijn.

Commissieorganen

Permanente vertegenwoordigers (bijeenkomsten 2 keer per jaar)

Redactiecomité

Werkgroepen

Contactgroepen

Rapporteurs

Produkten

Hydrologische Monografie »Het stroomgebied van de Rijn«.

Publikaties van rapporten van werkgroepen, rapporteurs (»serie I«) en individuele auteurs (»serie II«) – zie blz. 131.

Some information on the:

INTERNATIONAL COMMISSION FOR THE HYDROLOGY OF THE RHINE BASIN (CHR)

Foundation

1970 By regional co-operation of the national IHD-committees within the framework of UNESCO's IHD (International Hydrological Decade).

1975 Continuation of the activities in the framework of UNESCO's IHP (International Hydrological Programme) and the OHP (Operational Hydrological Programme) of WMO.

1978 Support of the Commission's activities by exchange of a verbal note through the foreign offices of the participating countries.

Participating countries

Switzerland, Austria, Federal Republic of Germany, France, Luxemburg, The Netherlands.

Working languages

French and German

Tasks

- Support of co-operation of the scientific hydrological institutes and the hydrological services in the Rhine basin.
- Promotion of the exchange of data and information in the Rhine basin (e.g. current data and forecasts).
- Standardization of data bases in the Rhine basin countries.
- Exchange of results of hydrological research in the Rhine basin.

Organs of the Commission

Permanent representatives (meetings twice a year)

Editing committee

Working groups

Contact groups

Rapporteurs

Results

Hydrological Monograph »The Rhine basin«.

Publications of reports compiled by working groups, rapporteurs (»series I«) and individual authors (»series II«) – see p. 131.

Werkgroepen en hun taken

»Standaardisering«:

- Op elkaar afstemmen van afvoermeetmethoden op grensoverschrijdende riviervakken van de Rijn en zijn zijrivieren.
- Bepaling van een meetnet voor een representatieve beschrijving der hydrologische situatie in het Rijngebied, alsmede een beschrijving der meetstations.
- Keuze van karakteristieke hydrologische parameters.
- Samenstellen van een overzicht van belangrijke meetstations in het Rijngebied.

»Stroomtijden«:

- Bepaling van de stroom- en verblijftijden in de Rijn (in samenwerking met de IRC).

Rapporteurs en hun taken

»Gebiedsneerslag«:

- Samenvatting van de in het Rijngebied toegepaste methoden.
- Voorstellen voor uitwisseling van actuele gegevens over gebiedsneerslag.

»Bibliografie«:

- Samenstelling van een lijst van hydrologische literatuur over het Rijngebied vanaf 1970 tot 1980.

»Voortzetting van de Monografie«:

- Overzicht van hydrologische gegevens over de periode 1971-1980 (vervolg op deel B der Monografie).

»Veranderingen in het afvoerregime«:

- Beschrijving van de antropogene invloeden op het afvoerregime van de Rijn.

»Buitengewone hydrologische gebeurtenissen«:

- De hoogwaters van 1983 op de Rijn en de Moezel.
- Het hoogwater van 1987 op de Rijn.

Working groups and their tasks

»Standardization«:

- Harmonization of discharge measurements for border-crossing riversections of the Rhine and its tributaries.
- Selection of a measuring network for the representative description of the hydrological situation in the Rhine basin, including a standardized account of the gauging stations.
- Selection of characteristic hydrological parameters.
- Compilation of a survey on important gauging stations in the Rhine basin.

»Travel times«:

- Determination of the travel and residence times in the Rhine (in co-operation with the IRC).

Rapporteurs and their tasks

»Areal precipitation«:

- Summary of methods applied in the Rhine basin.
- Recommendations for current exchange of areal precipitation data.

»Bibliography«:

- Compilation of a bibliography of hydrological publications on the Rhine basin from 1970 to 1980.

»Continuation of the Monograph«:

- Survey on hydrological data over the period 1971-1980 (continuation of part B of the Monograph).

»Changes in the discharge regime«:

- Description of the anthropogenic influences on the discharge regime of the Rhine.

»Extraordinary hydrological events«:

- The floods of 1983 on the Rhine and the Moselle.
- The flood of 1987 on the Rhine.

