

Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

La sécheresse et les basses eaux de 1976

Die Trocken- und Niedrigwasserperiode 1976

H. Gerhard
J. W. van der Made
J. Reiff
L. P. M. de Vrees



Rapport no. 1-2 de la CHR
Bericht Nr. 1-2 der KHR

Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

La sécheresse et les basses eaux de 1976

Die Trocken- und Niedrigwasserperiode 1976

H. Gerhard, Hessische Landesanstalt für Umwelt, Wiesbaden
J. W. van der Made, Rijkswaterstaat, Den Haag
J. Reiff, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt
L. P. M. de Vrees, Rijkswaterstaat, Den Haag



Secretariaat CHR | KHR
Hoofskade 1

Postbus 20907
2500 EX 's-Gravenhage
Pays-Bas | Niederlande

Rapport no. I-2 de la CHR, 2^{ème} édition, 1985
Bericht Nr. I-2 der KHR, 2. Auflage, 1985

langues originales: néerlandais et allemand
Originalsprachen: Niederländisch und Deutsch

© 1983, CHR/KHR
ISBN 90 70980010

PRÉFACE

La Décennie Hydrologique Internationale (DHI/IHD), 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. Les Etats riverains du Rhin se sont groupés dans le cadre de ce programme, comme d'autres Etats l'ont fait dans d'autres régions, et ils ont fondé ensemble en 1970 la »Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin« (CHR/KHR). Le Gouvernement des Pays-Bas s'est acquis la gratitude de ses partenaires en mettant à leur disposition un secrétariat permanent, chargé de la conduite des travaux. Aux côtés des Pays-Bas, la République fédérale d'Allemagne, la France, l'Autriche et la Suisse collaborent aux travaux de la CHR. Le premier résultat concret de cette activité a été la publication d'une »Monographie hydrologique«, ouvrage monumental décrivant les aspects géographiques et hydrologiques du bassin du Rhin, au travers d'un texte richement illustré, accompagné de cartes et de diagrammes sous forme d'atlas. Les données hydrologiques les plus importantes, provenant de stations de mesure sélectionnées, sont présentées dans un volume annexé, sous forme de tableaux. La »Monographie« se veut un inventaire de tout ce qui a trait à l'hydrologie dans le bassin du Rhin.

Lors de sa réunion plénière à Boppard (RFA) en 1978, la Commission a pris la décision de poursuivre la coopération sur la base de cet inventaire. Elle désire se consacrer à des questions pratiques importantes et par dessus tout à l'amélioration des échanges d'information et de données au travers des frontières entre Etats.

Comme déjà expliqué dans la monographie susmentionnée, la CHR s'est proposé d'établir un rapport sur les événements hydrologiques extraordinaires, comme les sécheresses ou les crues extrêmes. La sécheresse en Europe occidentale et centrale en 1976 constituait un tel événement.

A la séance plénière tenue à Boppard on a désigné deux rapporteurs (H. Gerhard et J. W. van der Made) qui furent chargés de dresser un rapport sur la sécheresse en 1976 et sur ses conséquences dans le bassin du Rhin. Le présent rapport a pu être établi grâce à la collaboration de plusieurs spécialistes et après consultation de différents rapports nationaux à ce sujet. Il forme le deuxième rapport dans la série I des publications de la CHR. En plus des publications officielles de la CHR, il existe une deuxième série de rapports (Série II), publiés sous l'égide de la CHR.

PDoz. Dr. H.-J. Liebscher
Président de la CHR

VORWORT

Im Rahmen der in den Jahren 1965 bis 1974 von der Unesco durchgeführten Internationalen Hydrologischen Dekade (IHD) galt einer der Schwerpunkte des Programms der Verbesserung der regionalen internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Hydrologie. Wie in anderen Regionen haben sich in diesem Programm auch die Rheinanliegerstaaten zusammengefunden und im Jahre 1970 die »Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes« (CHR/KHR) gegründet. Dabei stellte die niederländische Regierung dankenswerterweise ein ständiges Sekretariat für die Durchführung der Arbeiten zur Verfügung. Neben den Niederlanden arbeiten in der KHR die Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Österreich und die Schweiz mit. Als erstes Ergebnis veröffentlichte die KHR im Jahre 1978 eine umfangreiche hydrologische Monographie, in der die geographischen und hydrologischen Verhältnisse im Rheingebiet in einem Kartenwerk und einem Textteil dargestellt sind. Die wichtigsten hydrologischen Daten von ausgewählten Meßstellen sind in einem der Monographie beigefügten Tabellenteil aufgeführt. Die Monographie versteht sich als Inventar.

Auf ihrer Plenarsitzung im Jahre 1978 in Boppard/Bundesrepublik Deutschland hat die KHR die Fortsetzung der Zusammenarbeit auf der Grundlage dieses Inventars beschlossen. Dabei will sie sich wichtigen praktischen Fragen widmen, um vor allem den Informations- und Datenaustausch über die Landesgrenzen hinweg zu verbessern.

Wie schon in der erwähnten Monographie erläutert, hat sich die KHR vorgenommen, über außergewöhnliche hydrologische Ereignisse wie Trockenheiten und extreme Hochwässer zu berichten. Ein solches Ereignis war die Trockenheit in West- und Mitteleuropa im Jahre 1976.

Es wurden daher auf der Plenarsitzung in Boppard zwei Rapporteurs eingesetzt (H. Gerhard und J. W. van der Made) mit der Aufgabe, einen Bericht über die Trockenheit und ihre Auswirkungen im Rheingebiet anzufertigen. Der vorliegende Bericht kam dank der Mitarbeit verschiedener Sachverständiger sowie aufgrund verschiedener nationaler Berichte zu diesem Thema zustande. Er bildet die zweite Publikation in der Reihe I von KHR-Veröffentlichungen. Neben den offiziellen KHR-Veröffentlichungen wird eine zweite Reihe (II) von Berichten unter der Schirmherrschaft der KHR veröffentlicht.

PDoz. Dr. H.-J. Liebscher
Vorsitzender der KHR

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Préface</i>	3
1	Introduction	8
2	Considérations météorologiques sur la sécheresse de 1976 (J. Reiff, Pays-Bas)	9
2.1	Énoncé du problème	9
2.2	Précipitations	9
2.3	Répartition de la pression atmosphérique sur l'hémisphère nord	16
2.4	Températures de l'eau de mer en 1976	21
2.5	Conclusions	22
Fig. 2.1	Débites du Rhin à Lobith 1901...1975 et 1976; distribution de fréquence	10
Fig. 2.2	Répartition des précipitations sur l'Europe pour la période de mars...août 1976	12
Fig. 2.3	Écarts (en %) entre les précipitations de mars...août 1976 et les précipitations moyennes de la période 1931...1960	13
Fig. 2.4	Distributions de fréquences des précipitations pendant la période de mars...août selon les séries de Baur et de Braak	15
Fig. 2.5	Carte d'isohypses anormales de la surface de 500 mbar pour la période de mars...mai 1976 par rapport à la période 1949...1973	17
Fig. 2.6	Carte d'isohypses anormales de la surface de 500 mbar pour la période de juin...août 1976 par rapport à la période 1949...1973	18
Fig. 2.7	Carte des anomalies des températures superficielles de l'eau de mer pour la période de mars...mai 1976	19
Fig. 2.8	Carte des anomalies des températures superficielles de l'eau de mer pour la période de juin...août 1976	20
Tab. 2.1	Précipitations mensuelles dans le bassin du Rhin pour la période 1931...1960 et pour 1976	11
Tab. 2.2	Coefficients de corrélation r pour la relation linéaire entre les valeurs moyennes saisonnières des anomalies de 500 mbar d'une part et des anomalies des températures en surface de l'eau de mer d'autre part	22
3	Description hydrologique générale de la sécheresse de 1976 (L. P. M. de Vrees, Pays-Bas)	23
3.1	Introduction	23
3.2	Considérations hydrologiques	28
Fig. 3.1	Écarts à la normale 1931...1980 des débits moyens annuels à Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach et Lobith pour la période 1931...1980 (en %)	24
Fig. 3.2	Écarts à la normale 1931...1980 des débits moyens à Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach et Lobith pour la période de mars...août (1931...1980) (en %)	25
Fig. 3.3	Variations du niveau des eaux souterraines à Orschwiller, Rastatt-Foerch, Francfort, Dorsten et Hoenderloo	26
Fig. 3.4	Hydrogramme à Lobith pour la période 1975...1977 et débits moyens mensuels de la période 1931...1980	27
Fig. 3.5	Hydrogramme pour la période d'octobre 1975...janvier 1977 et débits moyens mensuels à Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach et Lobith et pour Lobith moins Rheinfelden pour la période 1931...1980	30
Tab. 3.1	Débites moyens mensuels et débits moyens sur 6 mois à Lobith pour plusieurs années sèches (en m ³ /s)	26
Tab. 3.2	Pourcentage des surfaces et des débits de quatre stations de mesure par rapport à celle de Lobith	32
4	Considérations statistiques (H. Gerhard, République fédérale d'Allemagne)	33
4.1	Régime hydrologique en étiage	33
4.2	Données	34
4.3	Vérification de l'homogénéité	35
4.4	Probabilité d'apparition de basses eaux	36
4.4.1	Courbes de même fréquence de débit	40
4.4.2	Fonction de répartition	43
4.4.3	Fréquences de débits moyens d'étiage	43
4.5	Appréciation de la période de sécheresse de 1976	46
Fig. 4.1	Débites moyens mensuels d'étiage pour quelques stations rhénanes pour les années 1951...1980	33
Fig. 4.2	Valeurs moyennes minimales des débits sur plusieurs jours pour quelques stations rhénanes pour les années 1951...1980	34
Fig. 4.3	Courbes doubles cumulées des débits aux stations de Bâle, Plochingen, Schweinfurt et Cochem	37
Fig. 4.4.a	Tendances et limites de signification (95%, 99%) des plus faibles moyennes sur plusieurs jours de la série 1821...1978	38
Fig. 4.4.b	Tendances et limites de signification (95%, 99%) des moyennes minimales journalières des débits de la série 1821...1978	39
Fig. 4.5.a...		
4.5.1	Courbes de même fréquence de débit et valeurs mensuelles minimales de l'année 1976	41
Fig. 4.6.a...		
4.6.1	Fréquences de débits moyens minimaux de basses eaux d'après la distribution de Weibull	44
Fig. 4.7	Distribution empirique des débits d'étiage de 1951...1978 de différentes durées pour la station de Kaub	46
Tab. 4.1	Stations utilisées avec bassin versant	35
Tab. 4.2	Débites caractéristiques des années de sécheresse 1921, 1934, 1947, 1964 et 1976	40
Tab. 4.3	Débites probables de périodes minimales de 5 jours de récurrence moyenne définie (d'après la distribution de Weibull)	46
Tab. 4.4	Débites moyens probables de la période de mars à août (m ³ /s) de récurrence moyenne définie (d'après la distribution de Weibull)	48

5	Bilan hydrique du bassin du Rhin en amont de Lobith pour la période d'octobre 1975 à janvier 1977 (L. P. M. de Vrees, Pays-Bas)	49
5.1	Établissement du bilan hydrique	49
5.2	Précipitations	50
5.3	Écoulement	51
5.4	Évapotranspiration	52
5.5	Emmagasinement	52
5.5.1	Généralités	52
5.5.2	Emmagasinement sous forme de neige	52
5.5.3	Volume stocké en eau souterraine	53
5.5.4	Emmagasinement sous forme d'humidité du sol	54
5.6	Autres considérations	55
Fig. 5.1	Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations dans le bassin du Rhin pendant la période d'octobre 1975...janvier 1977 et moyennes mensuelles des précipitations de la période 1931...1960	50
Fig. 5.2	Hydrogramme et hydrogramme de base à Lobith pour la période d'octobre 1975...janvier 1977	51
Tab. 5.1	Somme des précipitations, écoulements, évapotranspiration et emmagasinement pour trois périodes sur le bassin du Rhin en amont de Lobith	51
Tab. 5.2	Équivalents en eau de la couche de neige des hivers 1975/1976 et 1976/1977 jusqu'au 1er février 1977 inclus (mm)	53
6	Quelques conséquences de la sécheresse et évolution future	58
6.1	Quelques conséquences de la sécheresse de 1976 (L. P. M. de Vrees, Pays-Bas)	58
6.2	Évolution future (H. Gerhard, République fédérale d'Allemagne)	60
7	Résumé et recommandations (français, allemand, néerlandais, anglais)	62
	Bibliographie	69
	Annexes	
Annexe 1	Nappes aquifères dans le bassin du Rhin	72
Annexe 2	Carte géographique	73
Annexe 3	Hauteurs mensuelles des précipitations pendant la période 1931...1960 et en 1976	75
Annexe 4	Stations pluviométriques et polygones de Thiessen avec surfaces en km ²	77
Annexe 5	Bilan hydrique du bassin du Rhin	79
Annexe 6	Débits moyens journaliers minimaux et valeurs moyennes de 10 années à la station de Bâle	80

INHALTSVERZEICHNIS

	<i>Vorwort</i>	3
1	Einleitung	8
2	Meteorologische Betrachtungen über die Trockenperiode des Jahres 1976 (J. Reiff, Niederlande)	9
2.1	Problemstellung	9
2.2	Niederschlag	9
2.3	Luftdruckverteilung über der Nordhalbkugel	16
2.4	Meereswassertemperaturen im Jahre 1976	21
2.5	Schlußfolgerungen	22
Abb. 2.1	Abflüsse des Rheins bei Lobith 1901...1975 und 1976; Häufigkeitsverteilung	10
Abb. 2.2	Niederschlagsverhältnisse über Europa für die Periode März...August 1976	12
Abb. 2.3	Abweichungen (in %) zwischen den Niederschlägen in der Periode März...August 1976 und den mittleren Niederschlägen der Periode 1931...1960	13
Abb. 2.4	Empirische Überschreitungswahrscheinlichkeit der Niederschläge in der Periode März...August der Baur- und der Braak-Reihe	15
Abb. 2.5	500-mb-Höhenanomalien der Periode März...Mai 1976 im Vergleich zur Periode 1949...1973	17
Abb. 2.6	500-mb-Höhenanomalien der Periode Juni...August 1976 im Vergleich zur Periode 1949...1973	18
Abb. 2.7	Anomalienkarte der Meereswasseroberflächentemperatur für die Periode März...Mai 1976	19
Abb. 2.8	Anomalienkarte der Meereswasseroberflächentemperatur für die Periode Juni...August 1976	20
Tab. 2.1	Monatsniederschläge im Rheingebiet für die Periode 1931...1960 sowie für 1976	11
Tab. 2.2	Korrelationskoeffizienten r für die lineare Beziehung zwischen dem Saisonmittel der Anomalien für 500 mb einerseits und für Anomalien von Meereswasseroberflächentemperaturen andererseits	22
3	Allgemeine hydrologische Beschreibung der Trockenperiode von 1976 (L. P. M. de Vrees, Niederlande)	23
3.1	Einleitung	23
3.2	Hydrologische Betrachtungen	28
Abb. 3.1	Abweichungen der mittleren Jahresabflüsse für die Periode 1931...1980 vom langjährigen Mittel (Periode 1931...1980) für Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach und Lobith (in %)	24
Abb. 3.2	Abweichungen der mittleren Abflüsse von März...August für die Periode 1931...1980 vom langjährigen Mittel 1931...1980 in Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach und Lobith (in %)	25
Abb. 3.3	Verlauf der Grundwasserstände in Orschwiller, Rastatt-Foerch, Frankfurt, Dorsten und Hoenderloo	26
Abb. 3.4	Abflußganglinien Lobith für den Zeitraum 1975...1977 und langjährige mittlere Monatsabflüsse für die Periode 1931...1980	27
Abb. 3.5	Abflußganglinien für den Zeitraum Oktober 1975...Januar 1977 und langjährige mittlere Monatsabflüsse für die Periode 1931...1980 für Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach, Lobith und für Lobith minus Rheinfelden	30
Tab. 3.1	Mittlere Monats- und Halbjahresabflüsse verschiedener trockener Jahre (in m ³ /s) für Lobith	26
Tab. 3.2	Gegenüberstellung der Einzugsgebiete und der Abflüsse von vier Meßstationen mit Lobith	32
4	Statistische Betrachtungen (H. Gerhard, Bundesrepublik Deutschland)	33
4.1	Abflußregime bei Niedrigwasser	33
4.2	Datenmaterial	34
4.3	Homogenitätsprüfung	35
4.4	Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Niedrigwasser	36
4.4.1	Linien gleicher Abflußwahrscheinlichkeit	40
4.4.2	Verteilungsfunktion	43
4.4.3	Wahrscheinlichkeiten mittlerer Niedrigwasserabflüsse	43
4.5	Beurteilung der Trockenperiode 1976	46
Abb. 4.1	Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse für verschiedene Rheinpegel der Jahre 1951...1980	33
Abb. 4.2	Kleinste Mehrtagesmittelwerte der Abflüsse für verschiedene Rheinpegel der Jahre 1951...1980	34
Abb. 4.3	Doppelsummenkurven der Abflüsse an den Pegeln Basel, Plochingen, Schweinfurt und Cochem	37
Abb. 4.4.a	Trends mit Signifikanzgrenzen (95%, 99%) für kleinste Mehrtagesmittel der Reihe 1821...1978	38
Abb. 4.4.b	Trends mit Signifikanzgrenzen (95%, 99%) für mittlere niedrigste Tagesmittel der Abflüsse der Reihe 1821...1978	39
Abb. 4.5.a...		
4.5.1	Linien gleicher Abflußwahrscheinlichkeit und Monatsniedrigstwerte 1976	41
Abb. 4.6.a...		
4.6.1	Jährlichkeiten kleinster mittlerer Niedrigwasserabflüsse von zusammenhängenden Tagen nach Weibull-Verteilung	44
Abb. 4.7	Empirische Verteilung der Niedrigwasserabflüsse von 1951...1978 mit unterschiedlicher Dauer für den Pegel Kaub	46
Tab. 4.1	Einbezogene Pegel mit Einzugsgebieten	35
Tab. 4.2	Charakteristische Abflüsse in den Trockenjahren 1921, 1934, 1947, 1964 und 1976	40

Tab. 4.3	Wahrscheinliche Abflüsse kleinster 5-Tagesperioden bestimmter Jährlichkeit (nach Weibull-Verteilung)	46
Tab. 4.4	Wahrscheinliche mittlere Abflüsse für die Periode März bis August (m ³ /s) bestimmter Jährlichkeit (nach Weibull-Verteilung)	48
5	Wasserbilanz des Einzugsgebietes des Rheins oberhalb von Lobith für die Periode Oktober 1975...Januar 1977 (L. P. M. de Vrees, Niederlande)	49
5.1	Aufstellung der Wasserbilanz	49
5.2	Niederschlag	50
5.3	Abfluß	51
5.4	Verdunstung	52
5.5	Speicherung	52
5.5.1	Allgemeines	52
5.5.2	Speicherung in Form von Schnee	52
5.5.3	Grundwasserspeicherung	53
5.5.4	Speicherung in Form von Bodenfeuchte	54
5.6	Nachbetrachtung	55
Abb. 5.1	Mittlere monatliche Gebietsniederschlagshöhen im Rheingebiet für die Periode Oktober 1975...Januar 1977 und langjährige mittlere monatliche Niederschlagshöhen für die Periode 1931...1960	50
Abb. 5.2	Abflußganglinie und Basisabflußganglinie Lobith für die Periode Oktober 1975...Januar 1977	51
Tab. 5.1	Gesamtniederschlag, Abfluß, Verdunstung und Speicherung in drei Zeiträumen für das Einzugsgebiet des Rheins bis Lobith	51
Tab. 5.2	Wasseräquivalente der Schneedecke während der Wintermonate 1975/1976 und 1976/1977 bis 1. Februar 1977 (mm)	53
6	Einige Folgen der Trockenperiode und zukünftige Entwicklung	58
6.1	Einige Folgen der Trockenperiode von 1976 (L. P. M. de Vrees, Niederlande)	58
6.2	Künftige Entwicklung (H. Gerhard, Bundesrepublik Deutschland)	60
7	Zusammenfassung und Empfehlungen (Französisch, Deutsch, Niederländisch, Englisch)	62
	Literaturverzeichnis	69
	Anlagen	
Anlage 1	Grundwasservorkommen im Rheingebiet	72
Anlage 2	Geographische Karte	73
Anlage 3	Monatliche Niederschlagshöhen in der Periode 1931...1960 und im Jahre 1976	75
Anlage 4	Niederschlagsmeßstellen und Thiessenpolygone mit Flächenanteilen in km ²	77
Anlage 5	Wasserbilanz des Rheingebietes	79
Anlage 6	Niedrigste Tagesmittel der Abflüsse und deren Mittelwerte über 10 Jahre am Pegel Basel	80

1. INTRODUCTION

En 1976, une grande partie de l'Europe occidentale et centrale a été touchée par une sécheresse exceptionnelle. La zone concernée comprenait entre autres la majeure partie du bassin du Rhin.

Pour cette raison, il fut décidé lors de la cinquième session plénière de la CHR en 1978, d'étudier et de faire paraître dans une publication les différents aspects de cette sécheresse et les conséquences qu'elle a eues pour le bassin de Rhin du point de vue hydrologique.

La structure du présent rapport est plus ou moins la même que celle du chapitre A.6.2 de la monographie de la CHR («Considérations sur les périodes de basses eaux de 1959 et 1964»). Comme la sécheresse de 1976 paraissait cependant plus grave que celles de 1959 et 1964, les divers aspects de la sécheresse de 1976 (développements météorologiques, développements hydrologiques, considérations statistiques, le bilan hydrique et les conséquences de la sécheresse pour la vie sociale et l'environnement) furent traités ici plus en détail. La description de l'influence de la sécheresse de 1976 dans le bassin du Rhin a été faite à partir de différents rapports parus dans les Etats membres de la CHR à la suite de la sécheresse de 1976 et répertoriés dans la bibliographie jointe. La sécheresse n'ayant pas eu de conséquences importantes pour la partie autrichienne du bassin du Rhin, on n'a pas fait paraître de rapport autrichien. A part de ces rapports nationaux, la coopération de divers services et d'experts des états membres de la CHR a été indispensable à l'établissement de ce rapport.

La situation géographique de tous les sites, régions, rivières etc., cités dans le présent rapport, est représentée à l'annexe 2.

1. EINLEITUNG

1976 war ein großer Teil West- und Mitteleuropas von einer außergewöhnlichen Trockenperiode betroffen. Die Trockenperiode umfaßte u.a. den größten Teil des Einzugsgebietes des Rheins.

Deshalb wurde während der fünften Plenarsitzung der KHR in 1978 der Beschluß gefaßt, die verschiedenen Aspekte und Folgen, die diese Trockenperiode aus hydrologischer Sicht für das Einzugsgebiet des Rheins mit sich brachte, zu untersuchen und in einer KHR-Veröffentlichung zu beschreiben.

Die Struktur des vorliegenden Berichtes stimmt mehr oder weniger mit derjenigen des Kapitels A.6.2 der KHR-Monographie («Betrachtungen über die Niedrigwasserperioden von 1959 und 1964») überein. Weil die Trockenheit von 1976 aber wesentlich bedeutender erschien als diejenigen von 1959 und 1964, wurden die verschiedenen Aspekte der Trockenperiode 1976 (meteorologische Betrachtungen, hydrologische Entwicklungen, statistische Betrachtungen, die Wasserbilanz und die Folgen der Trockenheit für Wirtschaft und Umwelt) hier eingehender behandelt. Die Beschreibung des Einflusses, den die Trockenperiode 1976 im Einzugsgebiet des Rheins hatte, ist aus verschiedenen Berichten zusammengestellt, die in den Mitgliedstaaten der KHR aufgrund der Trockenperiode von 1976 erschienen und in der Literaturliste enthalten sind. Die Trockenperiode von 1976 hatte keine wesentlichen Auswirkungen für den österreichischen Teil des Rheineinzugsgebietes, so daß kein österreichischer Bericht erschienen ist. Nicht nur die nationalen Berichte, sondern auch die Mitarbeit verschiedener Dienststellen und Fachleute aus den Mitgliedstaaten der KHR war für das Zustandekommen dieses Berichtes unentbehrlich.

Die geographische Lage aller in diesem Bericht genannten Orte, Gebiete, Wasserläufe, u.dgl. wird in Anlage 2 dargestellt.

2. CONSIDÉRATIONS MÉTÉOROLOGIQUES SUR LA SÉCHERESSE DE 1976

2.1 Enoncé du problème

Comme déjà indiqué dans la Monographie du bassin du Rhin [CHR/KHR, 1978, par. A.6.2], les périodes de sécheresse, inévitablement accompagnées d'une diminution de l'écoulement du Rhin, durent souvent de nombreux mois. La description de la sécheresse de 1976 faite dans ce chapitre reste limitée à la période la plus extrême – calculée sur des périodes successives de 10 jours – pendant laquelle l'écoulement du Rhin à Lobith a atteint un niveau qu'on n'avait connu aussi bas que dans moins de 10% des cas depuis 1900. Cette période recouvre les mois de mars à août 1976 (fig. 2.1).

Ce chapitre traite en premier lieu des quantités de précipitations survenues pendant cette période et leur degré de rareté. Il est ensuite question de la cause météorologique directe de cette période de sécheresse, à savoir la répartition de la pression atmosphérique sur l'Europe. Enfin, on étudie la répartition de la pression atmosphérique sur tout l'hémisphère nord et la cause principale de cette répartition, à savoir les températures de l'eau de mer dans les océans Atlantique et Pacifique.

2.2 Précipitations

Entre mars et août 1976, une grande partie de l'Europe Occidentale et Centrale a reçu très peu de précipitations; le schéma de la figure 2.2 l'illustre bien. Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations régionales de la République fédérale d'Allemagne et des Pays-Bas, données dans le tableau 2.1, montrent que les mois de mars à août inclus ont été pour les deux pays plus secs que la normale.* Il ressort en outre du tableau que les stations de Zürich et de Nancy, considérées comme stations de référence pour les parties suisse et française du bassin du Rhin (annexe 2), donnent la même image, sauf pour le mois de juillet. La figure 2.3 contient les écarts entre les précipitations de la période de sécheresse de 1976 et les précipitations moyennes de longue durée des mois de mars à août. Cette figure a été établie à partir des précipitations de 21 stations. Ces stations sont les mêmes que celles qui ont été utilisées pour la description des périodes de sécheresse de 1959 et de 1964 dans la Monographie [CHR/KHR, 1978, par. A.6.2]. Les précipitations de ces 21 stations figurent à l'annexe 3.

* Conformément à l'usage international, la période de référence pour 1976 correspond aux années 1931 à 1960.

2. METEOROLOGISCHE BETRACHTUNGEN ÜBER DIE TROCKENPERIODE DES JAHRES 1976

2.1 Problemstellung

Wie bereits in der Monographie des Rheingebietes [CHR/KHR, 1978, Abschn. A.6.2] erwähnt, dauern Trockenperioden mit den daraus folgenden geringen Abflüssen des Rheins oftmals viele Monate an. Die in diesem Kapitel gegebene Beschreibung der Trockenperiode von 1976 bleibt auf den Zeitraum beschränkt, in dem – gerechnet über die aufeinanderfolgenden Dekaden (10 Tage) – der Abfluß des Rheins bei Lobith so gering war, wie er seit 1900 in weniger als 10% der Fälle auftrat. Dieser Zeitraum umfaßt die Monate März bis August 1976 (Abb. 2.1).

In diesem Kapitel wird zunächst kurz auf die Niederschlagsmengen eingegangen, die in diesem Zeitraum zu verzeichnen waren, sowie auf ihre Eintretenswahrscheinlichkeit. Anschließend wird die unmittelbare meteorologische Ursache dieser Trockenperiode – die Luftdruckverteilung über Europa – behandelt. Schließlich wird die Luftdruckverteilung auf der gesamten Nordhalbkugel betrachtet und ihre wichtigste Ursache beschrieben: die Wassertemperaturen des Atlantik und Pazifik.

2.2 Niederschlag

In einem großen Teil West- und Mitteleuropas fiel zwischen März und August 1976 sehr wenig Niederschlag; die grobe Skizze nach Abbildung 2.2 macht dies anschaulich. Die gebietsweisen Monatsmittelwerte des Niederschlags der Bundesrepublik Deutschland und der Niederlande (siehe Tab. 2.1) zeigen, daß die Monate März bis August sowohl in der Bundesrepublik als auch in den Niederlanden trockener als normal waren.* Aus der Tabelle geht ferner hervor, daß die Stationen Zürich und Nancy – die als »charakteristische« Stationen für den schweizerischen und französischen Teil des Einzugsgebietes des Rheins (Anlage 2) betrachtet werden – das gleiche Bild zeigen, wenn auch mit Ausnahme des Monats Juli. Abbildung 2.3 zeigt die Abweichungen des Niederschlags der Trockenperiode 1976 vom langjährigen mittleren Niederschlag der Monate März bis August, aufbauend auf Niederschlagsdaten von 21 Stationen. Es handelt sich um dieselben Stationen, die für die Beschreibung der Trockenperiode 1959 und 1964 in der Monographie [CHR/KHR, 1978, Abschn. A.6.2] benutzt worden sind. In Anlage 3 werden die Niederschlagsdaten dieser Stationen angegeben.

* Entsprechend den internationalen Festlegungen gilt für 1976 der Zeitraum 1931 bis 1960 als Bezugsperiode.

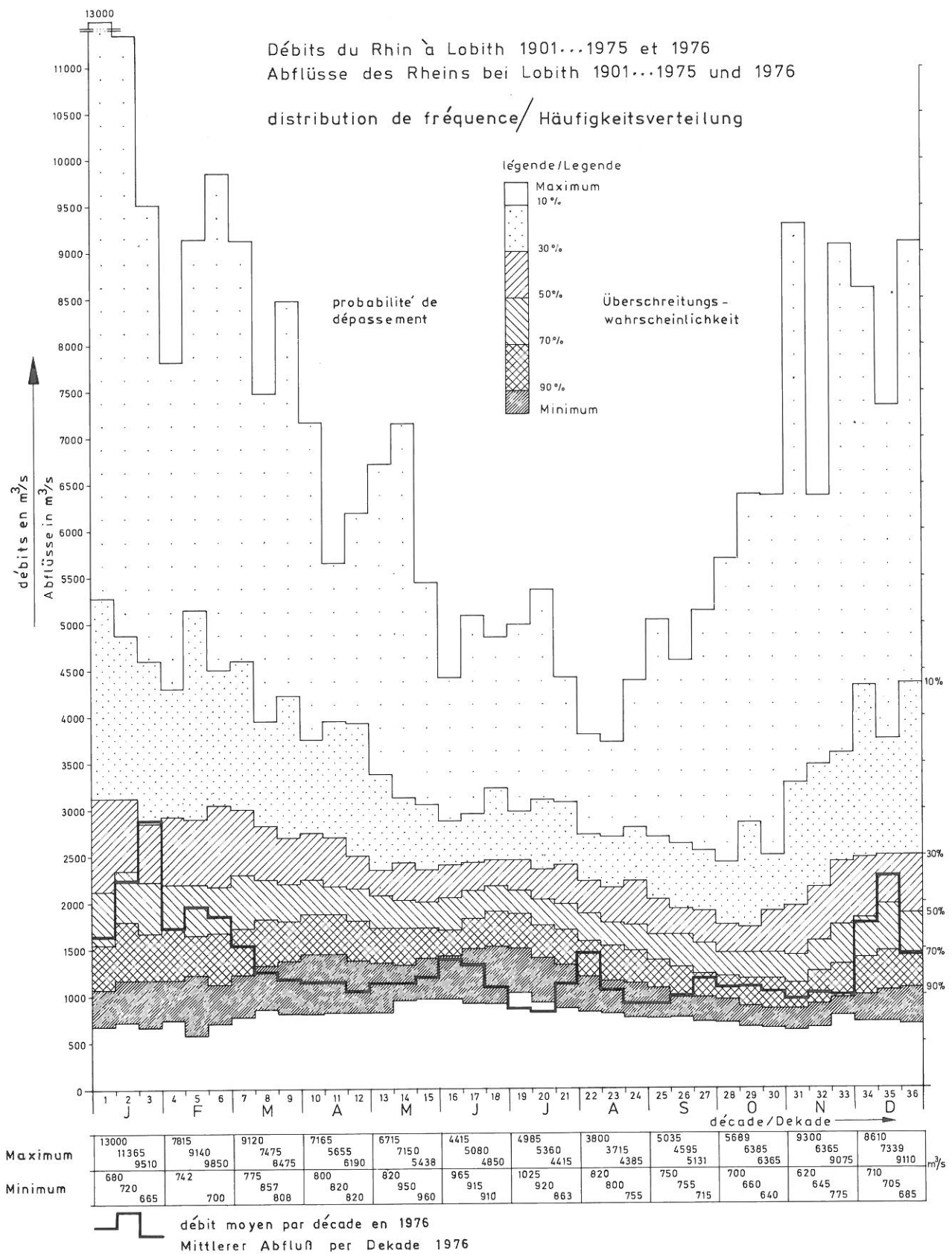


Fig. 2.1 Débits du Rhin à Lobith 1901...1975 et 1976; distribution de fréquence.

Abb. 2.1 Abflüsse des Rheins bei Lobith 1901...1975 und 1976; Häufigkeitsverteilung.

mois Monat	Valeurs des stations Stationswerte						Précipitations régionales Gebietsniederschläge					
	Zürich			Nancy			R.f. d'Allemagne ¹⁾ B.R. Deutschland ¹⁾			Pays-Bas ²⁾ Niederlande ²⁾		
	1931... 1960	1976		1931... 1960	1976		1931... 1960	1976		1931... 1960	1976	
	mm	mm	%	mm	mm	%	mm	mm	%	mm	mm	%
J	75	54	72	67	41	61	56	99	177	65	98	151
F	70	42	60	55	33	60	48	25	52	49	22	45
M	66	13	22	41	14	34	40	21	53	42	30	71
A	80	57	71	49	30	61	47	20	43	45	7	16
M	107	81	76	54	32	59	61	54	89	49	34	69
J	136	34	25	77	34	44	72	30	42	54	31	57
J	143	228	159	60	67	112	86	54	63	77	37	48
A	131	118	90	67	4	6	79	34	43	82	24	29
S	108	104	96	65	90	138	60	53	88	72	72	100
O	80	62	78	55	73	133	57	38	67	73	41	56
N	76	59	78	61	57	93	55	57	104	72	55	76
D	65	111	171	61	62	102	52	41	79	62	84	135
mars... août	663	531		348	181		385	213		349	163	
März... August			80			52			55			47

¹⁾ Série de Baur, basée sur 14 stations à l'ouest de l'Oder, à savoir: Kiel, Emden, Berlin, Hanovre, Gütersloh, Kleve, Kassel, Erfurt, Dresden, Francfort/Main, Bayreuth, Trèves, Karlsruhe et Munich.

²⁾ Série de Braak, basée sur 300 stations environ.

Tab. 2.1 Précipitations mensuelles dans le bassin du Rhin pour la période 1931...1960 et pour 1976.

¹⁾ Baur-Reihe, basierend auf 14 Stationen, westlich der Oder: Kiel, Emden, Berlin, Hannover, Gütersloh, Kleve, Kassel, Erfurt, Dresden, Frankfurt/Main, Bayreuth, Trier, Karlsruhe und München.

²⁾ Braak-Reihe, basierend auf ca. 300 Stationen.

Tab. 2.1 Monatsniederschläge im Rheingebiet für die Periode 1931...1960 sowie für 1976.

Pour évaluer les possibilités d'une sécheresse aussi importante qu'en 1976 entre les mois de mars et d'août pour la région considérée, on a utilisé les précipitations mensuelles moyennes de la République fédérale d'Allemagne et des Pays-Bas pour les six mois concernés. Il s'est avéré que les deux séries de données, qui comportent environ 125 années, correspondaient à la répartition normale [KNMI, 1976]. La figure 2.4 montre les fréquences au dépassement. On en déduit qu'une telle sécheresse ne se produit en République fédérale d'Allemagne en moyenne qu'une fois tous les 300 ans; il en est de même pour les Pays-Bas. Cette affirmation n'est cependant pas exempte d'une certaine incertitude. En statistiques, on indique l'incertitude au moyen de l'in-

Um nun zu untersuchen, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, daß die Periode März bis August für das betrachtete Gebiet ebenso trocken ist wie im Jahre 1976, wurden sowohl für die Bundesrepublik Deutschland als auch für die Niederlande die verfügbaren gebietsweisen Monatsmittelwerte der Niederschläge für diese sechs Monate einer näheren Betrachtung unterzogen. Hierbei zeigte sich, daß beide Reihen, die etwa 125 Jahre umfassen, der Normalverteilung entsprechen [KNMI, 1976]. Ihre Überschreitungswahrscheinlichkeiten sind in Abbildung 2.4 angegeben; hieraus ist abzulesen, daß eine solche Trockenperiode in der Bundesrepublik Deutschland durchschnittlich einmal alle 300 Jahre vorkommt; für die Niederlande gilt das gleiche. Aller-

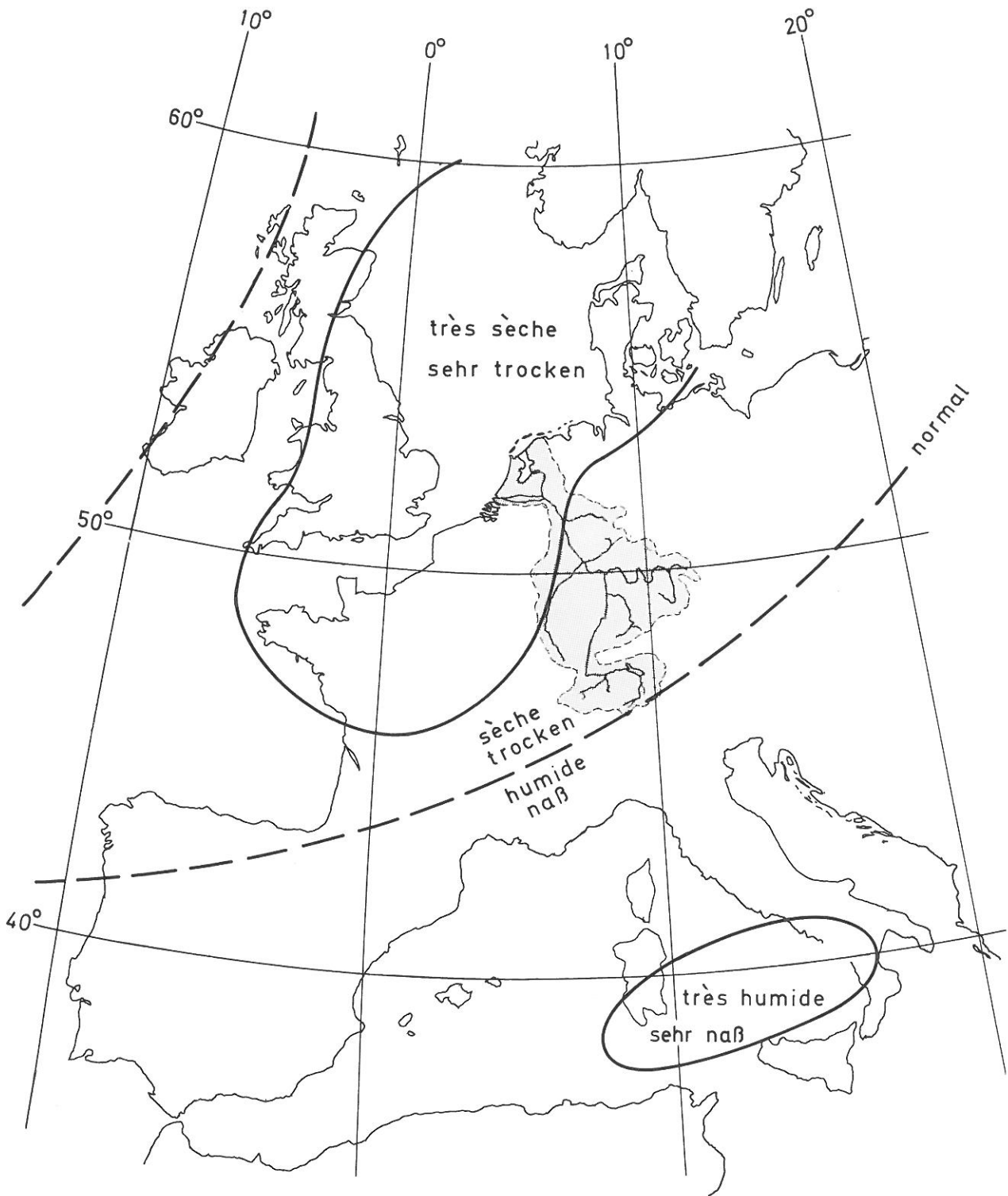
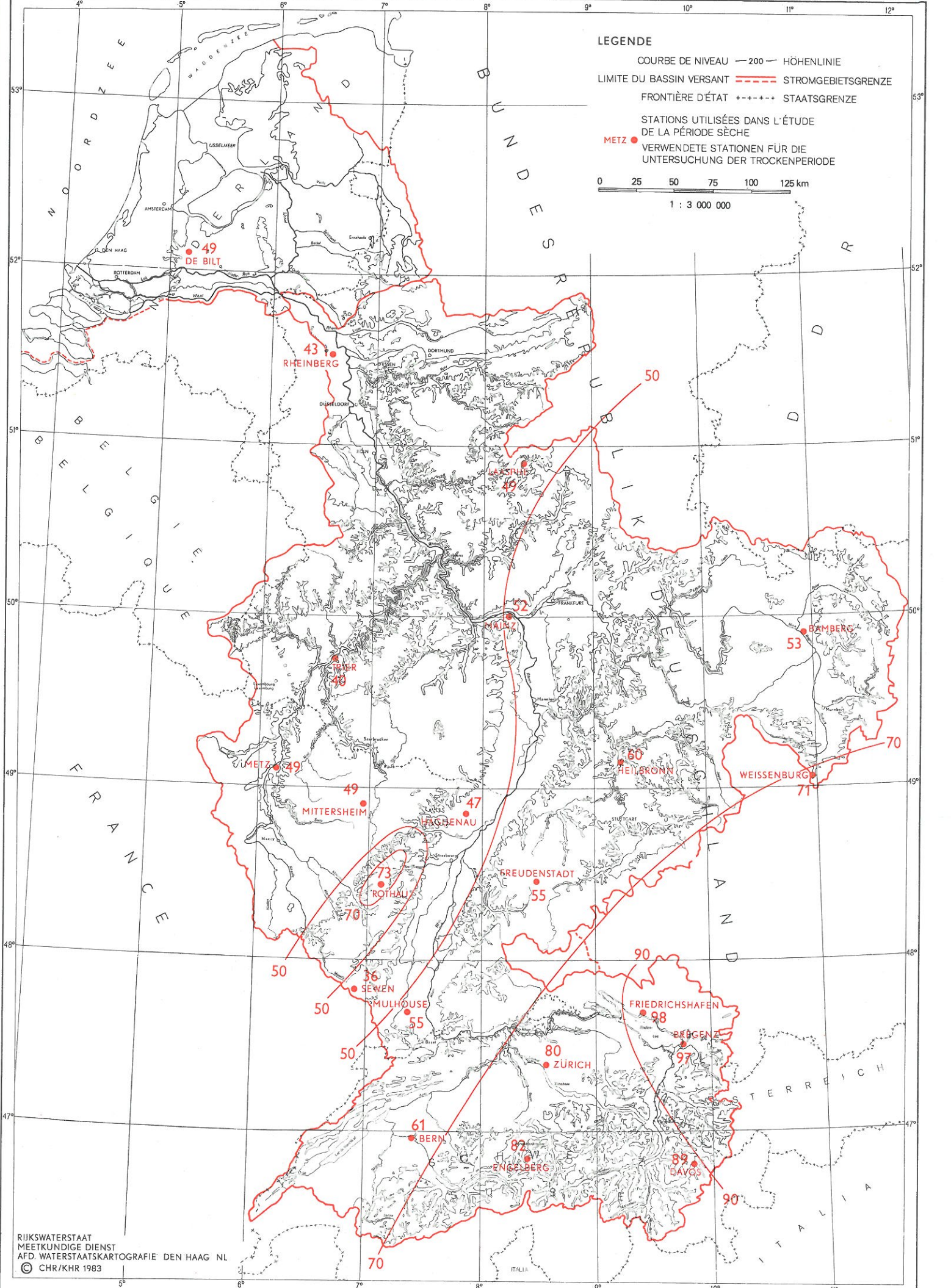


Fig. 2.2 Répartition des précipitations sur l'Europe pour la période de mars...août 1976.

Abb. 2.2 Niederschlagsverhältnisse über Europa für die Periode März...August 1976.



LEGENDE

COURBE DE NIVEAU — 200 — HÖHENLINIE
 LIMITE DU BASSIN VERSANT — — — — — STROMGEBIETSGRENZE
 FRONTIÈRE D'ÉTAT - - - - - STAATSGRENZE

STATIONS UTILISÉES DANS L'ÉTUDE DE LA PÉRIODE SÈCHE
 ● METZ
 ● VERWENDETE STATIONEN FÜR DIE UNTERSUCHUNG DER TROCKENPERIODE

0 25 50 75 100 125 km
 1 : 3 000 000

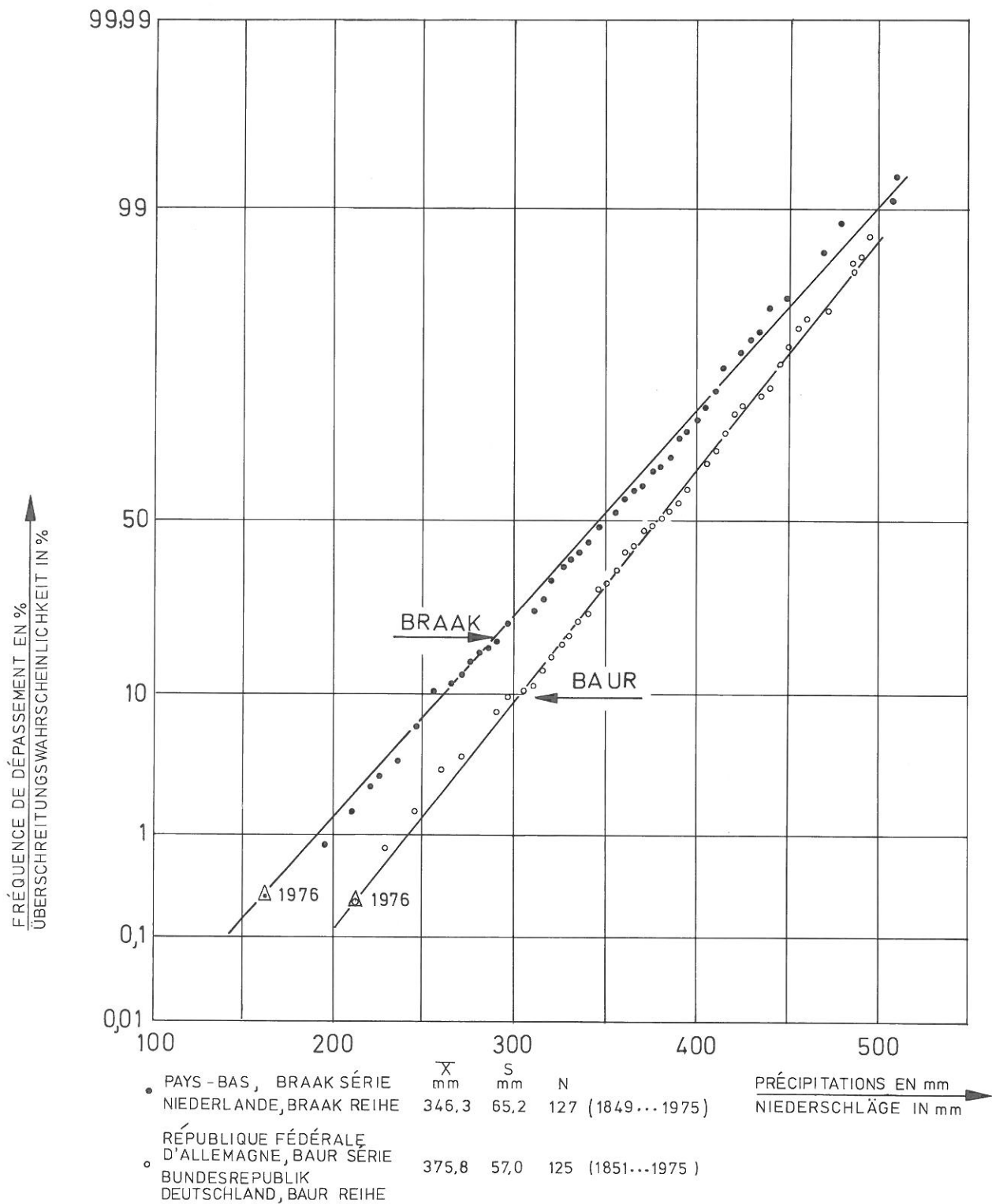


Fig. 2.4 Distributions de fréquences des précipitations pendant la période de mars...août selon les séries de Baur et de Braak.

Abb. 2.4 Empirische Überschreitungswahrscheinlichkeit der Niederschläge in der Periode März...August der Baur- und der Braak-Reihe.

tervalle de confiance. Celui-ci a été défini pour les deux séries de données et le résultat obtenu a été celui-ci:

– Si, dans le futur, les caractéristiques statistiques ne changent pas dans la série de précipitations (donc s'il ne survient pas de changements climatiques) on peut dire avec une certitude de 95% qu'une période de sécheresse comme celle de 1976 se produit entre 1 fois tous les 150 ans et 1 fois tous les 2000 ans.

– La sécheresse de 1976 a été également extrême dans tout le bassin du Rhin à l'exception des régions du Rhin alpin. Dans cette partie du bassin du Rhin, il a plu en juillet sensiblement plus que la »normale« (tab. 2.1 et annexe 3).

2.3 Répartition de la pression atmosphérique sur l'hémisphère nord

Les affirmations précédentes étaient d'ordre statistique. Il est toutefois important de rechercher les causes météorologiques de cette sécheresse et de déterminer s'il y a une possibilité quelconque de prévoir un tel phénomène. Des études antérieures (entre autres [CHR/KHR, 1978, par. A.6.2]) avaient montré qu'il y a une relation entre les périodes de sécheresse et l'apparition de zones de pressions anormales sur l'Europe occidentale. Pour les latitudes tempérées, ceci peut en général s'expliquer de la manière suivante: à l'est de »zones de haute pression anormales« d'un niveau moyen de 500 mbar dominent des mouvements descendants qui refoulent aussi bien la formation d'ondées sur une petite échelle que l'apparition de perturbations frontales sur une grande échelle. Ces mouvements descendants maintiennent donc un temps sec.

La présence en 1976 de zones de haute pression anormales de 500 mbar sur l'Europe occidentale est légèrement visible sur la figure 2.5 et clairement visible sur la figure 2.6. Une comparaison entre les figures 2.2 et 2.6 fait apparaître que la sécheresse anormale qui a sévi sur une zone de 1000 km sur 1000 km environ, peut s'expliquer par une zone de haute pression anormale au-dessus des Iles Britanniques, zone qui recouvrait en gros la même surface.

Une comparaison avec deux autres années de faible débit du Rhin, 1959 et 1964, révèle qu'il y avait alors également des zones de haute pression anormales de 500 mbar dans les environs [CHR/KHR, 1978, par. A.6.2].

dings ist eine solche Aussage selbst wieder mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. In der mathematischen Statistik gibt man die Unsicherheit durch die Vertrauensgrenzen an; diese wurden für beide Reihen bestimmt, wobei sich folgendes herausstellte:

– Wenn die Niederschlagsreihe künftig nicht ihre statistischen Eigenschaften ändert (wenn also keine Klimaänderung auftritt), kommt eine Trockenperiode wie die des Jahres 1976 bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% zwischen 1 mal in 150 Jahren und 1 mal in 2000 Jahren vor.

– Die Trockenperiode von 1976 war für das gesamte Rheineinzugsgebiet mit Ausnahme von Gebieten des Alpenrheins gleichermaßen extrem. In diesem Teil des Rheingebietes hatte es jedoch im Juli bedeutend mehr als »normal« geregnet (Tab. 2.1 und Anlage 3).

2.3 Luftdruckverteilung über der Nordhalbkugel

Die obigen Aussagen waren rein statistischer Natur. Es ist jedoch wichtig, die meteorologischen Ursachen dieser Trockenperiode aufzudecken und zu untersuchen, ob es in der Zukunft gelingt, solche Trockenperioden mehr oder weniger genau vorherzusagen. Frühere Untersuchungen (u.a. [CHR/KHR, 1978, Abschn. A.6.2.]) haben bereits gezeigt, daß eine Beziehung zwischen Trockenperiode und dem Vorkommen von anomalen Hochdruckgebieten über Westeuropa besteht. Für gemäßigte Breiten ist dies im allgemeinen wie folgt zu erklären: an der Ostseite von anomalen Hochdruckgebieten in einer mittleren Höhengschicht von 500 mb herrschen absinkende Luftbewegungen vor, die sowohl Schauerbildung in geringer räumlicher Ausdehnung als auch die Entstehung von großräumigen frontalen Störungen stark unterdrücken. Diese Abwärtsbewegungen halten also eine trockene Wetterlage aufrecht.

In Abbildung 2.5 ist schwach und in Abbildung 2.6 deutlich zu sehen, daß 1976 in der 500-mb-Höhenschicht über Westeuropa solche anomalen Hochdruckgebiete bestanden haben. Ein Vergleich zwischen den Abbildungen 2.2 und 2.6 zeigt, daß die anormale Trockenperiode, die sich über ein Gebiet mit einer Ausdehnung von etwa 1000 km mal 1000 km erstreckte, durch ein anomales Hochdruckgebiet über den Britischen Inseln, das ein etwa gleichgroßes Gebiet umfaßte, erklärt werden kann.

Aus einem Vergleich mit zwei anderen Jahren mit geringem Abfluß im Rhein – 1959 und 1964 – geht hervor, daß auch damals in der 500-mb-Höhenschicht anomale Hochdruckgebiete in der Umgebung vorhanden waren, wenn auch in einer etwas anderen Ortslage [CHR/KHR, 1978, Abschn. A.6.2].

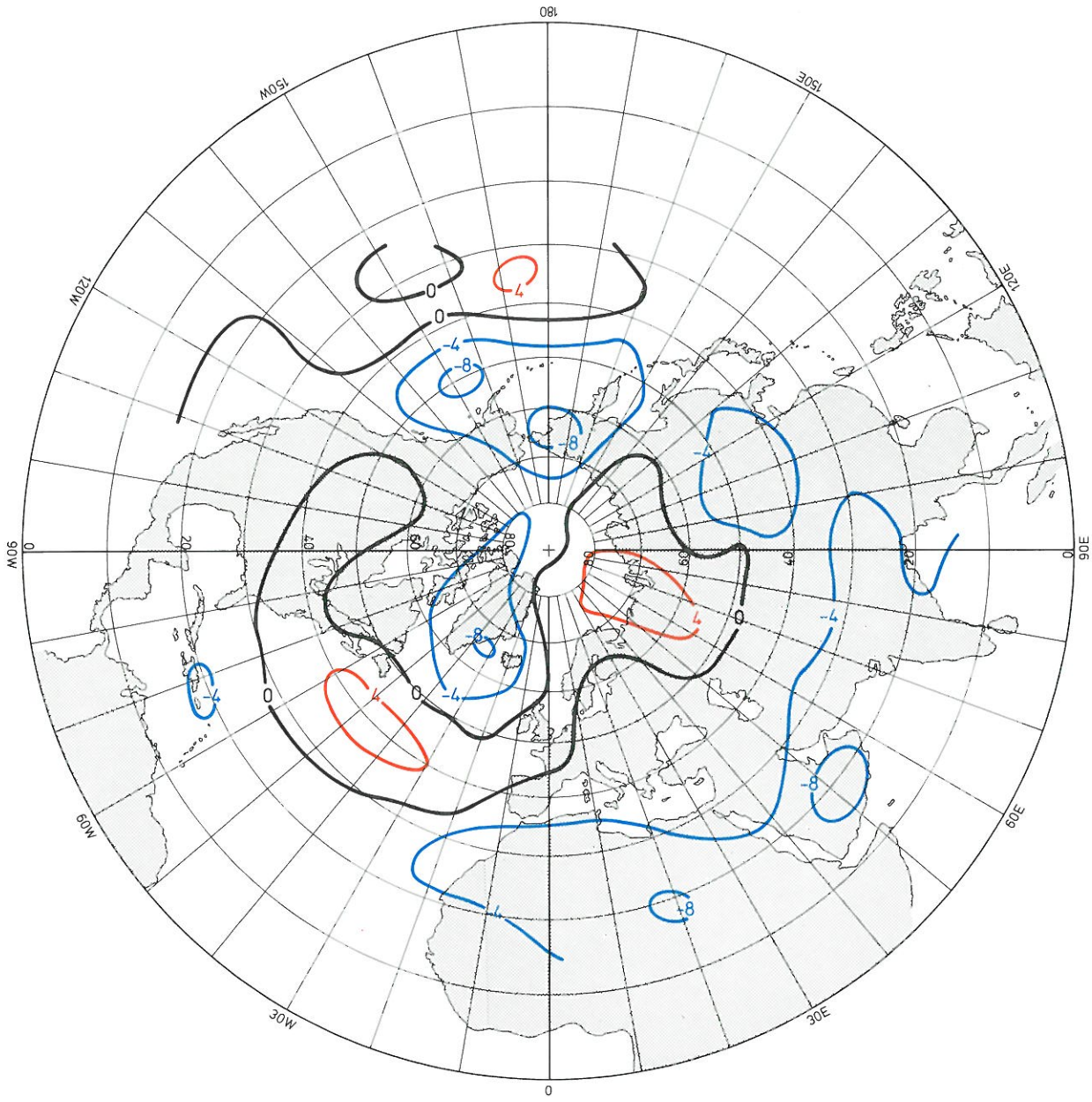


Fig. 2.5 Carte d'isohypses anormales de la surface de 500 mbar pour la période de mars...mai 1976 par rapport à la période 1949...1973.

Abb. 2.5 500-mb-Höhenanomalien der Periode März...Mai 1976 im Vergleich zur Periode 1949...1973.

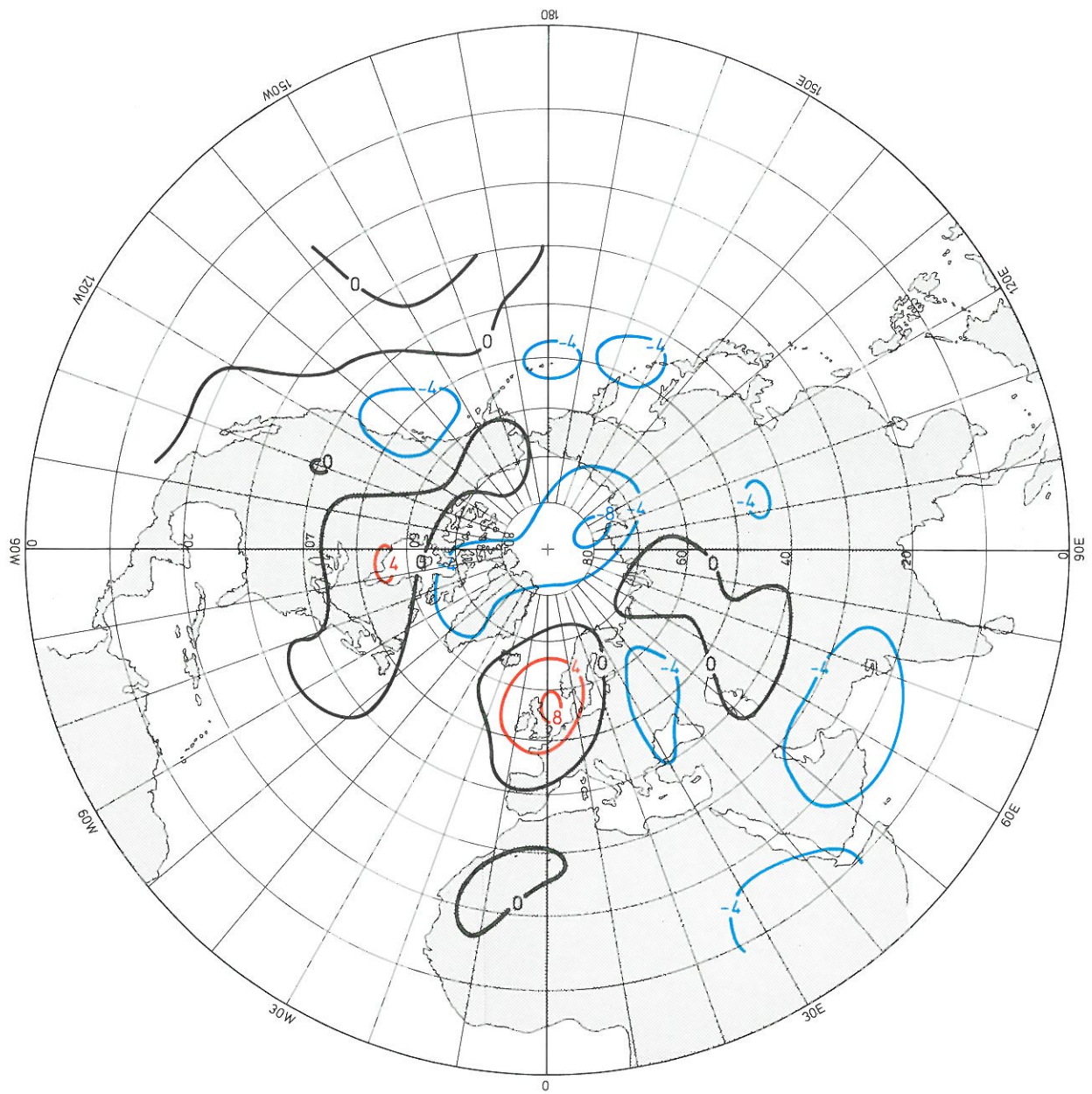


Fig. 2.6. Carte d'isohypses anormales de la surface de 500 mbar pour la période de juin...août 1976 par rapport à la période 1949...1973.

Abb. 2.6 500-mb-Höhenanomalien der Periode Juni...August 1976 im Vergleich zur Periode 1949...1973.

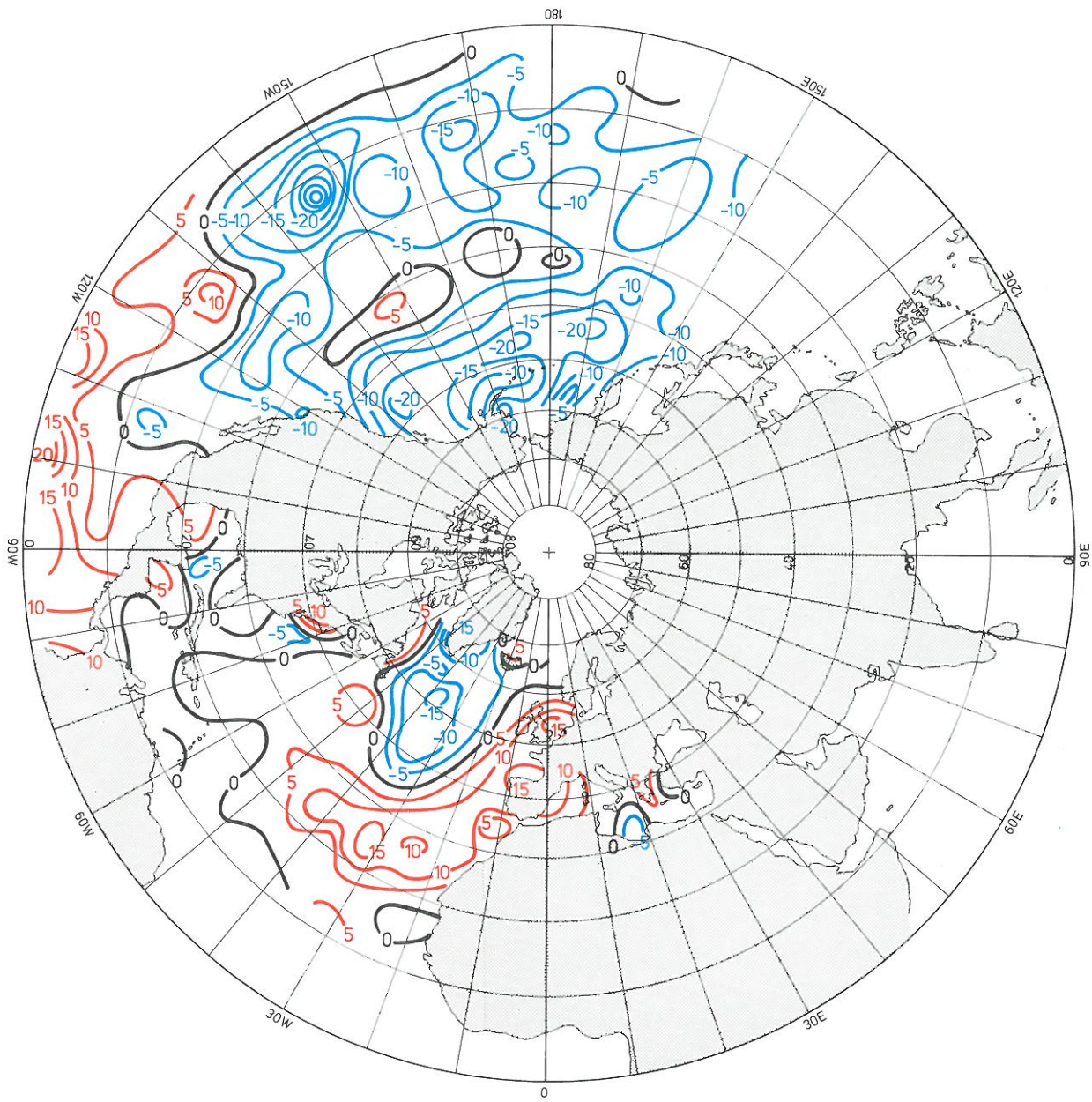


Fig. 2.7 Carte des anomalies des températures superficielles de l'eau de mer pour la période de mars...mai 1976.

Abb. 2.7 Anomalienkarte der Meereswasseroberflächentemperatur für die Periode März...Mai 1976.

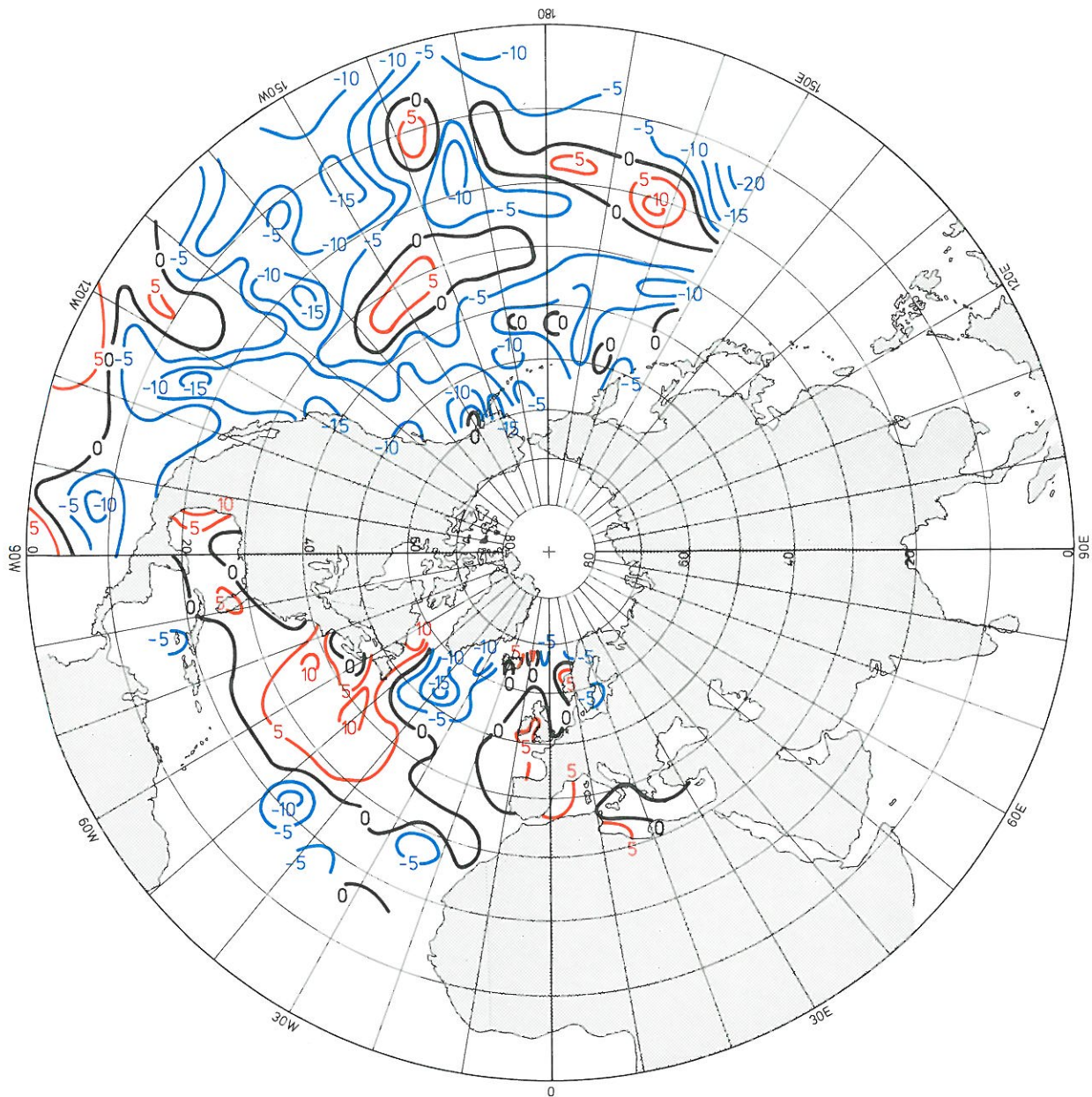


Fig. 2.8 Carte des anomalies des températures superficielles de l'eau de mer pour la période juin...août 1976.

Abb. 2.8 Anomalienkarte der Meereswasseroberflächentemperatur für die Periode Juni...August 1976.

Une zone de haute pression fortement anormale de 500 mbar se forme chaque année quelque part sur l'hémisphère nord. Mais, si l'on suppose qu'il y a chaque année sur l'hémisphère nord une zone de haute pression anormale de 500 mbar de 1000 km sur 1000 km environ, il n'y a qu'une chance sur 500 pour que son centre se trouve pendant six mois au-dessus de la Grande-Bretagne. Cette possibilité correspond à la possibilité de dépassement citée au paragraphe 2.2, qui est basée sur les séries de précipitations historiques pour la République fédérale d'Allemagne et les Pays-Bas. Cette argumentation n'implique cependant certainement pas qu'il ne puisse pas y avoir dans le bassin de Rhin une année encore plus sèche que 1976.

2.4 Températures de l'eau de mer en 1976

On pourrait se contenter de l'explication du paragraphe 2.3 et attribuer la sécheresse de 1976 à la présence fortuite d'une zone de haute pression anormale de 500 mbar. Les météorologues pensent cependant que des anomalies de 500 mbar comme celle de la figure 2.6 ne se produisent pas fortuitement. Ils estiment que ces anomalies, lorsqu'elles persistent plus d'un mois ou d'une saison, sont dues à des influences extérieures en bordure de la troposphère («forcing») [NAMIAS, 1978; RATCLIFFE, 1978]. Pour l'hémisphère nord, ces influences extérieures viennent des tropiques, de la stratosphère, du sol ou de la surface de la mer. Une étude énergétique – c'est-à-dire la mesure de la quantité de chaleur qui circule sur les bordures de la troposphère – permet de penser que c'est l'été que l'influence de la mer sur la troposphère est de loin la plus forte. Des études statistiques le confirment [REIFF, 1978]: elles démontrent qu'il y a un rapport entre les températures de surface moyennes saisonnières des océans Atlantique et Pacifique et le temps moyen saisonnier en différents endroits de l'hémisphère nord. C'est dans ce cadre qu'on a analysé plus précisément le lien entre les »zones de haute pression anormales de 500 mbar« et les températures de l'eau de mer pour 1975 et 1976.

Le tableau 2.2 donne, pour les zones situées entre 25° et 65° de latitude nord – dans la mesure où les données étaient disponibles – les coefficients de corrélation r , tels qu'ils ont été calculés dans un certain nombre de cas pour ces deux grandeurs par régression linéaire.

On peut alors, selon les règles de la statistique mathématique, expliquer la partie r^2 de la variance, qui est due à la régression; l'autre partie $(1-r^2)$ correspond à la variance résiduelle non expliquée. Il ressort du tableau que pour les mois de mars à mai 1976, r était égal à 0,60, ce qui signifie que 36% de la variance de la carte

Ein starkes anomales Hochdruckgebiet in 500-mb-Höhe kommt jedes Jahr irgendwo auf der Nordhalbkugel vor. Nimmt man an, daß sich alljährlich ein anomales Hochdruckgebiet in 500-mb-Höhe mit einer Ausdehnung von rund 1000 km mal 1000 km auf der Nordhalbkugel ausbildet, so ist die Wahrscheinlichkeit, daß sein Schwerpunkt zufällig innerhalb von 6 Monaten über Großbritannien liegt, 1:500. Diese Wahrscheinlichkeit entspricht der im Abschnitt 2.2 genannten Überschreitungswahrscheinlichkeit, die auf historischen Niederschlagsreihen für die Bundesrepublik Deutschland und die Niederlande basiert. Aus dieser Betrachtung folgt übrigens keineswegs, daß nun für das Einzugsgebiet des Rheins ein noch trockeneres Jahr als 1976 ausgeschlossen wäre.

2.4 Meereswassertemperaturen im Jahre 1976

Man könnte sich mit der Erklärung von Abschnitt 2.3 begnügen und die Trockenperiode von 1976 der zufälligen Lage eines anomalen Hochdruckgebietes in der 500-mb-Höhenschicht zuschreiben. Meteorologen sind jedoch der Ansicht, daß Anomalien in der 500-mb-Höhe – wie solche gemäß Abbildung 2.6 – nicht zufällig zustandekommen. Sie sind der Meinung, daß Anomalien, die länger als einen Monat oder als eine Saison lang bestehen, durch eine Beeinflussung von außen her am Rande der Troposphäre zustandekommen («forcing») [NAMIAS, 1978; RATCLIFFE, 1978]. Von außen her bedeutet für die Nordhalbkugel: aus den Tropen, aus der Stratosphäre oder aus der darunterliegenden Land- oder Meereswasserfläche. Aufgrund von energetischen Erwägungen – durch Untersuchungen darüber, wieviel Wärme über die Grenzen der Troposphäre hinwegströmt – ist zu erwarten, daß der Einfluß des Meeres auf die Troposphäre in den Sommermonaten bei weitem am größten ist. Dies wird durch statistische Untersuchungen gestützt [REIFF, 1978]; sie zeigen, daß ein Zusammenhang zwischen den über die Saison gemittelten Oberflächentemperaturen von Atlantik und Pazifik und der über die Saison durchschnittlichen Wetterlage der Nordhalbkugel besteht. In diesem Rahmen wurde die Beziehung zwischen »500-mb-Höhenanomalien« und Meereswassertemperaturen für 1975 und 1976 näher untersucht.

In Tabelle 2.2 sind für die Gebiete zwischen 25° und 65° nördlicher Breite – soweit hierüber Daten verfügbar waren – die Korrelationskoeffizienten r aufgeführt, wie sie für einige Fälle für diese beiden Größen mittels linearer Regression berechnet wurden.

Nun ist laut mathematischer Statistik der Term r^2 der Varianz aus der Regression erklärbar, der andere Term $(1-r^2)$ bleibt als nicht erklärte Restvarianz übrig. Aus der Tabelle geht nun hervor, daß r für die Monate März...Mai 1976 den Wert 0,60 hat, d.h. daß 36% der Varianz der 500-mb-Anomalienkarte aus Meereswas-

Année Jahr	mars...mai März...Mai	juin...août Juni...August
1975	0,17	0,24
1976	0,60	0,46
1977	0,02	0,44

Tab. 2.2 Coefficients de corrélation r pour la relation linéaire entre les valeurs moyennes saisonnières des anomalies de 500 mbar d'une part et des anomalies des températures en surface de l'eau de mer d'autre part.

des anomalies de 500 mbar peut s'expliquer par des anomalies de la température de l'eau de mer; au niveau de 2σ la liaison est significative (on a utilisé pour le calcul environ 50 variables indépendantes). Pour les mois de juin à août, le pourcentage est de 20% (cf. fig. 2.5 à 2.8).

On ne connaît pas encore dans quelle mesure il y a interdépendance causale entre les anomalies des hautes pressions de 500 mbar et les anomalies des températures de l'eau de mer, quoi que la connaissance des phénomènes dynamiques, jouant un rôle dans cette interaction, se soit accrue considérablement pendant les dernières années [OPSTEEGH et VAN DEN DOOL, 1980; HOSKINS et KARDY, 1981]. Il n'est pas encore possible de prévoir de façon satisfaisante les anomalies des températures de l'eau de mer, et il faudra attendre encore quelques années pour prévoir avec un minimum de certitude les hautes pressions de 500 mbar et les sécheresses qui en découlent.

2.5 Conclusions

– L'analyse des précipitations montre qu'une période de sécheresse comme celle de 1976 se produit en moyenne entre une fois tous les 150 ans et une fois tous les 2000 ans.

– De même que celles de 1959 et de 1964, la sécheresse de 1976 peut s'expliquer par l'apparition d'une zone de haute pression anormale de 500 mbar au-dessus de l'Europe occidentale. En 1976 le centre de cette zone de haute pression anormale se trouvait au-dessus des Îles Britanniques.

– Pour le printemps et l'été 1976, on peut expliquer 20 à 35% de la variance de la moyenne saisonnière du phénomène de haute pression de 500 mbar par la température moyenne saisonnière de la surface de l'eau de mer. On peut donc supposer qu'en 1976 les températures de l'eau de mer ont eu une grande influence sur l'apparition de la période de sécheresse.

– Comme on ne peut prévoir de façon sûre ni les anomalies des températures moyennes saisonnières de l'eau de mer, ni les anomalies des hautes pressions moyennes saisonnières de 500 mbar, il n'est pas non plus possible de prévoir actuellement des périodes de sécheresse telles que celle de 1976.

Tab. 2.2 Korrelationskoeffizienten r für die lineare Beziehung zwischen dem Saisonmittel der Anomalien für 500 mb einerseits und für Anomalien von Meereswassererflächentemperaturen andererseits.

sertemperaturanomalien erklärt werden können; auf dem Niveau von 2σ ist dieses signifikant (bei der Berechnung wurden etwa 50 unabhängige Variablen benutzt). Für die Monate Juni bis August beträgt der entsprechende Prozentsatz 20% (siehe Abb. 2.5 bis 2.8).

Der kausale Zusammenhang zwischen der »500-mb-Höhenanomalie und der Meereswassertemperaturanomalie« ist noch nicht im einzelnen geklärt, obwohl unsere Kenntnis über die bei diesen Wechselwirkungen mitspielenden dynamischen Prozesse während der letzten Jahre erheblich zugenommen hat [OPSTEEGH und VAN DEN DOOL, 1980; HOSKINS und KARDY, 1981]. Auch ist eine befriedigende Prognose von Meereswassertemperaturanomalien noch nicht möglich, so daß eine einigermaßen zuverlässige Vorhersage der »500-mb-Fläche« und eine damit gekoppelte Vorhersage von Trockenperioden wohl noch einige Jahre auf sich warten lassen dürfte.

2.5 Schlußfolgerungen

– Die Niederschlagsanalyse zeigt, daß eine Trockenperiode wie 1976 durchschnittlich zwischen einmal in 150 und einmal in 2000 Jahren vorkommt.

– Ebenso wie 1959 und 1964 kann die Trockenperiode von 1976 durch das Auftreten eines anomalen Hochdruckgebietes in der 500-mb-Höhe über Westeuropa erklärt werden. 1976 lag das Zentrum dieses anomalen Hochdruckgebietes über den Britischen Inseln.

– 20 bis 35% der Varianz im Saisonmittel der 500-mb-Fläche im Frühjahr und Sommer 1976 wird durch das Saisonmittel der Meereswassererflächentemperatur erklärt. Deshalb kann angenommen werden, daß die Meereswassertemperaturen einen großen Einfluß auf das Zustandekommen der Trockenperiode hatten.

– Weil weder das Saisonmittel der Meereswassertemperaturanomalien noch das Saisonmittel der 500-mb-Höhenanomalien zuverlässig vorhergesagt werden können, ist vorerst auch noch keine Vorhersage von Trockenperioden, wie der des Jahres 1976, möglich.

3. DESCRIPTION HYDROLOGIQUE GÉNÉRALE DE LA SÉCHERESSE DE 1976

3.1 Introduction

La sécheresse de 1976 s'est manifestée entre autres par de faibles débits du Rhin et de ses affluents pendant le printemps et l'été.

Cette sécheresse n'était cependant pas fortuite. Elle avait été précédée d'une période sèche commencée déjà en 1971 et qui n'avait été interrompue que par l'année 1975 relativement humide.

La figure 3.1 permet de comparer les débits moyens annuels observés aux stations hydrométriques de Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach et Lobith, à la moyenne correspondante de la période 1931 à 1980. Les écarts par rapport à la moyenne de longue durée sont exprimés en pour cent.

Les cinq stations reflètent l'influence des débits des sous-bassins sur le débit du Rhin. Ainsi, la station de Rheinfelden montre l'influence de la zone alpine. Les écoulements du Rhin près de Worms sont également représentatifs de la zone du Rhin supérieur. La station de Kaub révèle l'influence du Main, la station d'Andernach celle de la Moselle et la station de Lobith est représentative pour le Rhin.

D'après la figure 3.1, l'année 1972 se caractérise par un débit moyen annuel plus faible qu'en 1976. Toutefois, la sécheresse de 1976 fut plus importante (voir fig. 3.2). Cette figure compare pour les cinq stations les débits moyens des mois secs (mars à août) avec la moyenne de longue durée correspondante de la période 1931 à 1980. Il s'avère que les débits moyens de l'été de 1976 ont été les plus faibles depuis 1931.

Le tableau 3.1 donne les débits moyens mensuels et la moyenne mobile sur six mois pour quelques années sèches de la station de Lobith. Il ressort de ce tableau, qu'en 1976, la période ayant des débits faibles s'est produite plus tôt qu'en 1949. Toutefois, le débit moyen minimal de six mois en 1976 est supérieur à celui de 1949. La sécheresse de 1976 n'est donc pas caractérisée par les valeurs des faibles débits, mais par le fait, que les faibles débits se sont déjà produits tôt dans l'année.

3. ALLGEMEINE HYDROLOGISCHE BESCHREIBUNG DER TROCKENPERIODE VON 1976

3.1 Einleitung

Die Trockenperiode von 1976 war u.a. durch niedrige Abflüsse des Rheins und seiner Nebenflüsse im Frühjahr und Sommer gekennzeichnet.

Diese Trockenperiode war keine Einzelercheinung. Ihr ging eine schon 1971 einsetzende Reihe von Trockenperioden voraus, die nur durch das relativ nasse Jahr 1975 unterbrochen wurde.

In Abbildung 3.1 werden die mittleren Abflußwerte der Abflußjahre der Meßstationen Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach und Lobith mit den mittleren hydrologischen Jahresabflüssen der Reihe 1931 bis 1980 verglichen. Die Abweichungen gegenüber dem langjährigen Mittel sind in Prozent aufgetragen.

Die fünf Stationen zeigen den Einfluß der einzelnen Teilgebiete auf den Abfluß des Rheins. So gibt Rheinfelden den Einfluß des Alpengebietes wieder. Die Abflüsse des Rheins bei Worms sind für das oberrheinische Gebiet repräsentativ. Bei Kaub sind die Abflüsse des Mains, bei Andernach die Abflüsse der Mosel enthalten. Lobith schließlich ist maßgebend für den gesamten Rhein.

Nach Abbildung 3.1 war 1972 zwar ein Jahr mit einem kleineren mittleren Jahresabfluß als 1976, dennoch war die Trockenperiode von 1976 bedeutungsvoller (s. Abb. 3.2). In dieser Abbildung werden für die fünf Stationen die mittleren Abflüsse der trockenen Monate März bis August mit dem langjährigen Mittel dieser Monate der Reihe 1931 bis 1980 verglichen. Es zeigt sich, daß der mittlere Sommerabfluß von 1976 der kleinste seit 1931 ist.

In der Tabelle 3.1 werden für einige trockene Jahre die mittleren Monatsabflüsse und die gleitenden Mittelwerte von jeweils sechs Monaten für Lobith angegeben. Aus der Tabelle geht hervor, daß 1976 die Periode mit niedrigen Abflüssen früher aufgetreten ist als 1949. Jedoch ist der Wert des kleinsten mittleren Abflusses innerhalb von sechs Monaten für 1976 größer als derjenige des Jahres 1949. Charakteristisch für 1976 ist also nicht der Wert der niedrigen Abflüsse, sondern die Tatsache, daß die niedrigen Abflüsse schon früh im Jahr aufgetreten sind.

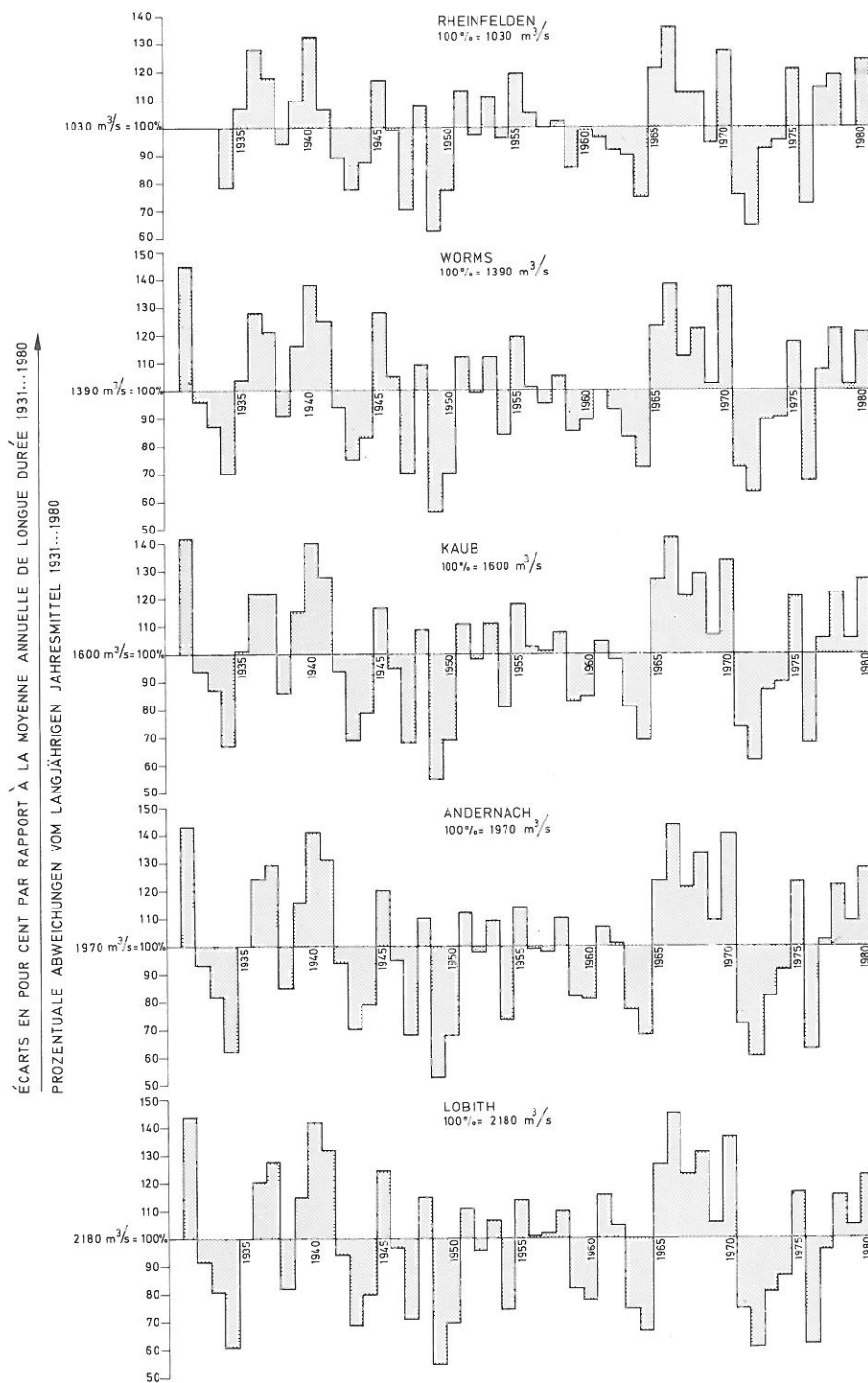


Fig. 3.1 Écarts à la normale 1931...1980 des débits moyens annuels à Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach et Lobith pour la période 1931...1980 (en %).

Abb. 3.1 Abweichungen der mittleren Jahresabflüsse für die Periode 1931...1980 vom langjährigen Mittel (Periode 1931...1980) für Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach und Lobith (in %).

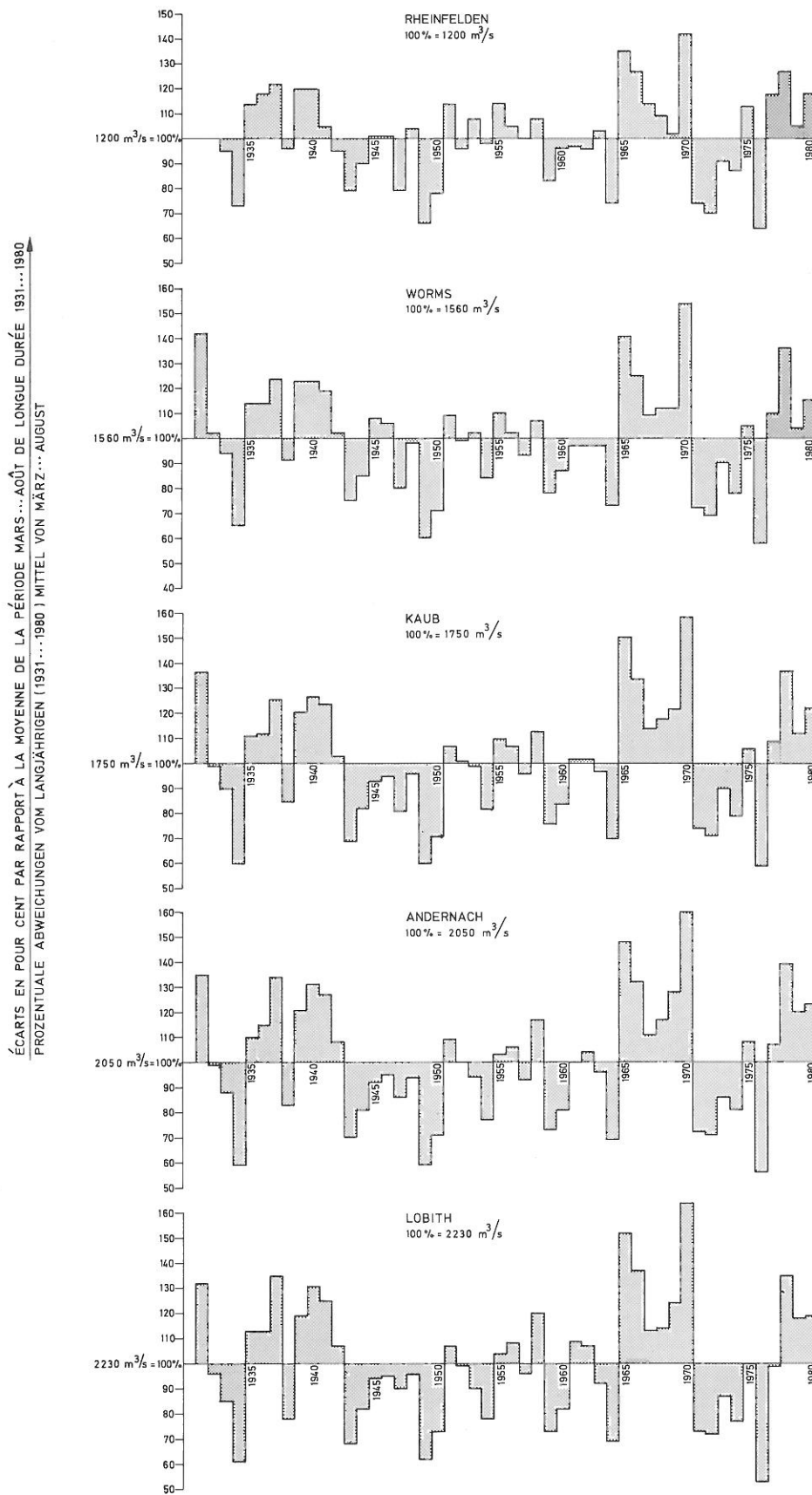


Fig. 3.2 Écarts à la normale 1931...1980 des débits moyens à Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach et Lobith pour la période de mars...août (1931...1980) (en %).

Abb. 3.2 Abweichungen der mittleren Abflüsse von März...August für die Periode 1931...1980 vom langjährigen Mittel 1931...1980 in Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach und Lobith (in %).

Année	Jahr												jan... juin	fév... juil.	mars... août	avril... sept.	mai... oct.	juin... nov.	juil... déc.
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Jan... Juni	Feb... Juli	März... Aug.	April... Sept.	Mai... Okt.	Juni... Nov.	Juli... Dez.
1934	1487	1250	1787	1310	1243	986	1279	1499	1498	1215	1223	1346	1348*	1312	1353	1303	1287	1284	1343
1949	1307	1150	1665	1478	1490	1741	1011	815	782	710	748	1417	1476	1425	1364	1218	1090*	966*	915*
1964	991	1431	1607	2020	2062	1566	1057	919	953	1086	1646	1733	1613	1624	1536	1428	1274	1201	1232
1972	993	1128	910	1736	1540	1832	1803	1708	1219	875	2257	2049	1354	1492	1586	1640	1496	1613	1651
1976	2281	1832	1329	1130	1167	1272	953	1141	1021	1068	1229	1811	1502	1275*	1165*	1114*	1103	1113	1205

— plus petite valeur mensuelle et semestrielle de l'année civile considérée

* plus petite valeur semestrielle des 5 années

Tab. 3.1 Débits moyens mensuels et débits moyens sur 6 mois à Lobith pour plusieurs années sèches (en m³/s)

— niedrigste Monatswerte bzw. Halbjahreswerte aus dem betrachteten Kalenderjahr

* niedrigster Halbjahreswert der 5 Jahre

Tab. 3.1 Mittlere Monats- und Halbjahresabflüsse verschiedener trockener Jahre (in m³/s) für Lobith

La figure 3.3 reproduit les variations du niveau des eaux souterraines relevées à quelques stations piézométriques du bassin de Rhin et montre la conséquence de la période de sécheresse commencée en 1970 sur l'eau souterraine. On y remarque de façon nette, la forte baisse du niveau de la nappe phréatique à partir de 1970. Pour les stations de mesure de Dorsten et Hoenderloo, la vidange n'a été interrompue qu'en 1975. La station de Hoenderloo montre un exemple de l'écoulement de l'eau d'une nappe située dans une région relativement élevée pour les Pays-Bas et comportant une importante zone non-saturée. Dans cette région, la décroissance du niveau s'est prolongée jusqu'à la stabilisation en 1979.

Die Folgen der seit 1970 herrschenden Trockenperiode auf das Grundwasser sind aus Abbildung 3.3 ersichtlich, die den Grundwassergang einiger Meßstationen im Rheineinzugsgebiet wiedergibt. Deutlich ist das starke Absinken des Grundwasserspiegels nach 1970 erkennbar. Für die Meßstationen Dorsten und Hoenderloo wurde nur im Jahre 1975 die sinkende Linie unterbrochen. Die Meßstation Hoenderloo zeigt beispielhaft den Grundwassergang in einem für die Niederlande relativ hoch gelegenen Gebiet mit einer großen ungesättigten Zone. In diesem Gebiet setzte sich das Absinken des Grundwasserspiegels bis zur Stabilisierung in das Jahr 1979 fort.

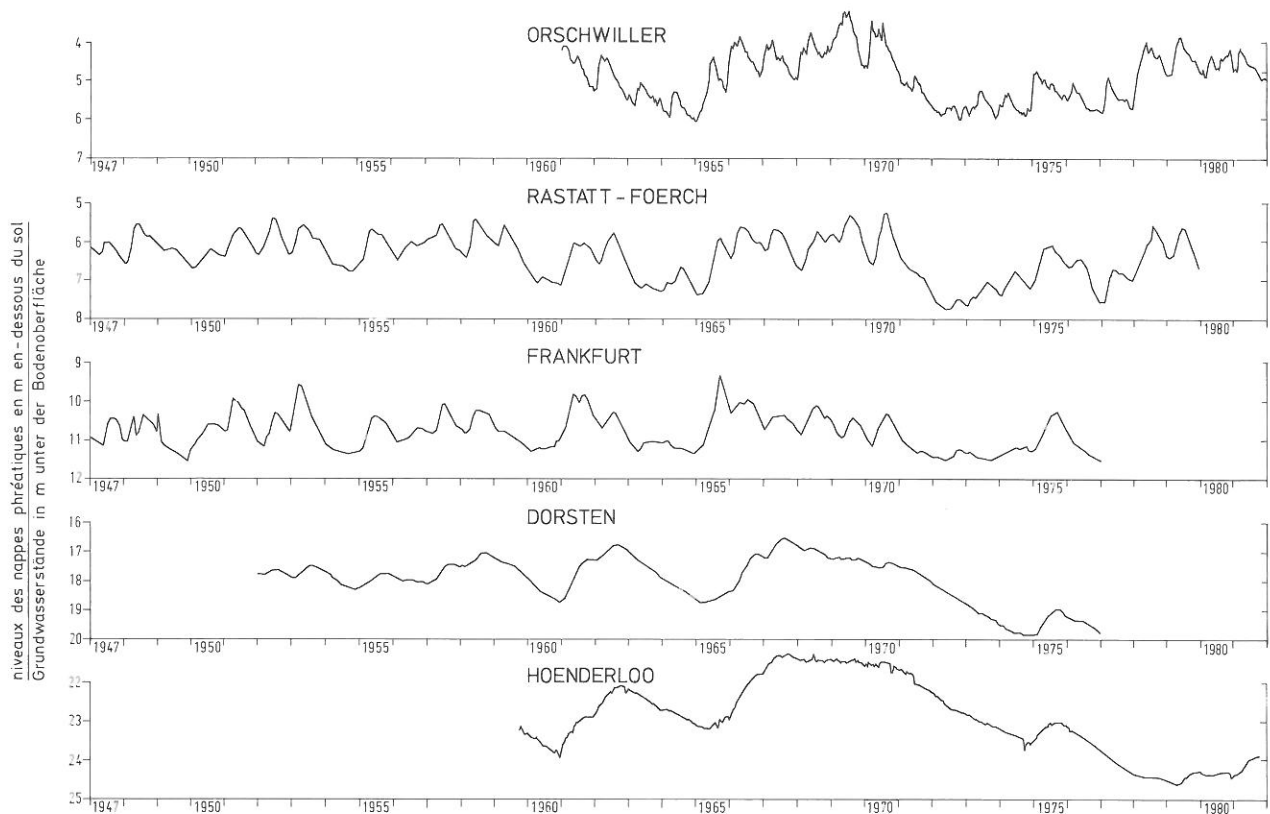


Fig. 3.3 Variations du niveau des eaux souterraines à Orschwiller, Rastatt-Foerch, Francfort, Dorsten et Hoenderloo.

Abb. 3.3 Verlauf der Grundwasserstände in Orschwiller, Rastatt-Foerch, Frankfurt, Dorsten und Hoenderloo.

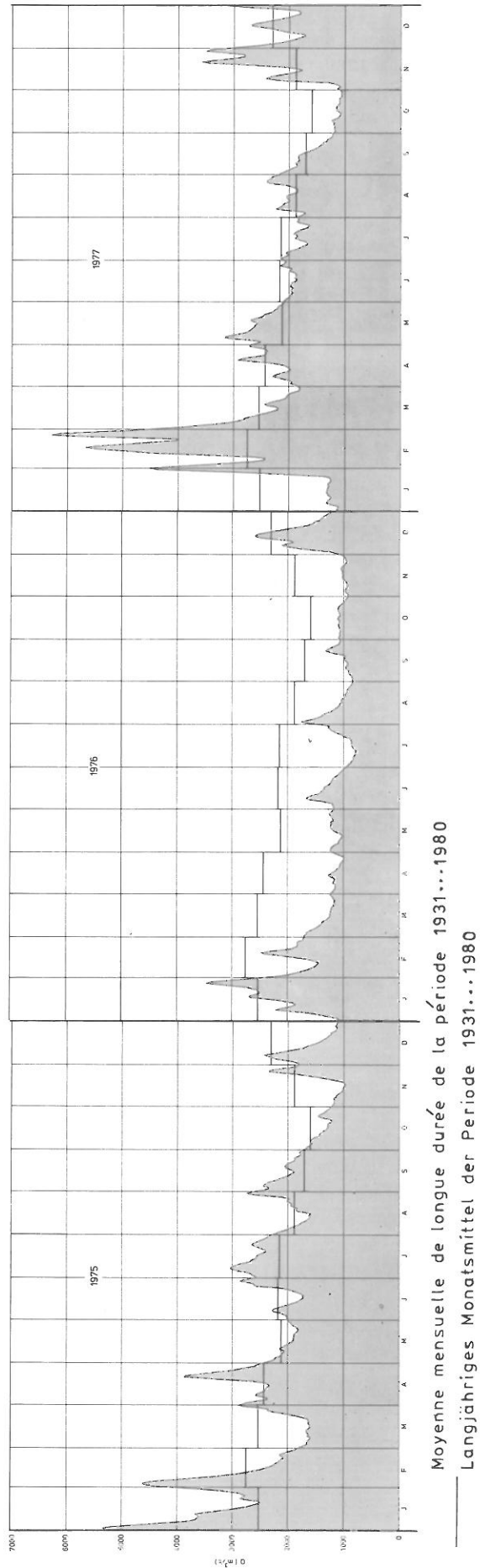


Fig. 3.4 Hydrogramme à Lobith pour la période 1975...1977 et débits moyens mensuels de la période 1931...1980.

Abb. 3.4 Abflußganglinien Lobith für den Zeitraum 1975...1977 und langjährige mittlere Monatsabflüsse für die Periode 1931...1980.

C'est à la fin de l'année hydrologique 1975 relativement humide, c'est-à-dire en octobre, que débuta la période de sécheresse de 1976. A partir de ce mois le débit mensuel moyen est resté inférieur à la moyenne mensuelle de la période 1931 à 1980. L'hydrogramme du Rhin à Lobith (fig. 3.4) le montre clairement.

Au cours des mois de novembre 1975 et janvier 1976, il y a encore des débits journaliers qui dépassent la moyenne mensuelle de la période, mais il faudra attendre février 1977 pour que la moyenne mensuelle soit à nouveau plus élevée que la moyenne mensuelle de la période. Cette sécheresse dura en tout 16 mois.

3.2 Considérations hydrologiques

Comme il a été dit dans le paragraphe précédent, la sécheresse de 1976 a débuté, pour le bassin du Rhin, dès octobre 1975. C'est seulement au cours des mois de novembre 1975 et janvier 1976 que les précipitations ont été légèrement supérieures aux moyennes mensuelles de longue durée (1931 à 1960). En raison des faibles précipitations durant les autres mois de l'hiver 1975/1976 la quantité de neige dans la région alpine est restée nettement inférieure à la moyenne de longue période [SCHILD et GLIOTT, 1977]

Dans le reste du bassin, la faiblesse des précipitations hivernales a eu pour conséquence que les réserves des nappes phréatiques ne furent pas alimentées. Or, on a déjà indiqué au paragraphe 3.1 que les niveaux des nappes étaient déjà bas lors de l'hiver 1975/1976.

De février à juillet 1976, c'est surtout dans le bassin situé en aval de Rheinfelden que les quantités de précipitations sont restées nettement inférieures (de 40 à 70%) aux moyennes mensuelles de longue durée (voir tab. 2.1).

La neige, tombée dans les Alpes et les Préalpes durant l'hiver 1975/1976, a commencé à fondre en mars 1976; à la fin d'avril 1976, elle avait presque complètement disparu. Seules les stations en altitude, comme le Weißfluhjoch, ont vu la neige jusqu'en juin, ce qui implique que la fonte a eu lieu 3 semaines plus tôt qu'en temps normal. La quantité d'eau de fonte a été naturellement inférieure à celle des autres années, d'où une montée lente suivie d'une baisse précoce du niveau des lacs préalpins. Les conséquences ont été relativement graves surtout pour les lacs non régulés. En juillet, le niveau du lac de Constance était déficitaire d'environ 1 m. Pour les lacs régulés, les effets ont été limités à un écart de quelques centimètres par rapport aux moyennes mensuelles de longue durée, pour le Lac des Quatre Cantons jusqu'à 23 cm.

Am Ende des relativ nassen Abflußjahres 1975, d.h. im Oktober, setzte die Trockenperiode von 1976 ein. Beginnend mit diesem Monat blieb der mittlere Monatsabfluß unterhalb des langjährigen Monatsmittels des Abflusses in der Reihe 1931 bis 1980. Dies zeigt die Abflußganglinie des Rheins bei Lobith (s. Abb. 3.4).

In den Monaten November 1975 und Januar 1976 kommen noch Tagesabflüsse vor, die das langjährige Monatsmittel übersteigen, doch dauerte es bis Februar 1977, bevor das Monatsmittel größer wurde als das langjährige Monatsmittel. Diese Trockenperiode dauerte insgesamt 16 Monate an.

3.2 Hydrologische Betrachtungen

Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, begann die Trockenperiode 1976 für das Einzugsgebiet des Rheins bereits im Oktober 1975. Nur in den Monaten November 1975 und Januar 1976 war die Niederschlagsmenge etwas größer als die langjährigen Monatsmittel für den Zeitraum 1931 bis 1960. Infolge des geringen Niederschlags während der anderen Monate des Winters 1975/1976 blieb die Schneemenge im Alpengebiet weit unter dem langjährigen Mittel [SCHILD und GLIOTT, 1977]

Für den restlichen Teil des Einzugsgebietes bewirkte das Ausbleiben normaler Winterniederschläge, daß das Grundwasser nicht ergänzt wurde. Es wurde bereits erwähnt, daß die Grundwasserspiegel im Winter 1975/1976 ohnehin schon niedrig waren. (s. Abschn. 3.1).

Von Anfang Februar bis Juli 1976 blieben vor allem für das Einzugsgebiet unterhalb von Rheinfelden die Niederschlagsmengen weit hinter den langjährigen Monatsmitteln zurück, und zwar variierend von 40 bis 70% (siehe Tab. 2.1).

In den Alpen und Voralpen begann der Schnee des Winters 1975/1976 im März 1976 zu schmelzen; schon Ende April 1976 war die Schneeschmelze fast abgeflossen. Nur bei den hochgelegenen Stationen, wie Weißfluhjoch, dauerte es bis Juni, bis der Schnee verschwunden war. Dies trat dort jedoch 3 Wochen früher als normal ein. Die hierbei freiwerdende Schmelzwassermenge war naturgemäß auch geringer als in anderen Jahren. Dies hatte zur Folge, daß der Wasserstand der Alpenrandseen nur langsam stieg und früher als normal wieder sank. Vor allem für die nicht regulierten Seen waren die Folgen schwerwiegend. Der Wasserstand des Bodensees blieb im Juli etwa 1 m unter normal. Bei den regulierten Seen blieb der Einfluß auf eine Abweichung der Wasserstände gegenüber dem langjährigen Monatsmittel von einigen Zentimetern beschränkt, beim Vierwaldstättersee bis auf 23 cm.

Le printemps 1976 a été marqué par un important nombre d'heures d'ensoleillement et par des températures moyennes élevées. C'est ainsi qu'en juin le soleil a brillé pendant plus de 300 heures à Metz et à Nancy alors que la moyenne de la période 1951 à 1975 est d'environ 225 heures. La température de ce mois de juin à Metz et à Strasbourg a été en moyenne de 2°C plus élevée que la moyenne de la période 1921 à 1950. Ceci a eu pour conséquence une élévation de l'évaporation potentielle par rapport à la normale; étant donné le manque d'eau, l'évaporation réelle a cependant été inférieure à la normale.

Etant donné la baisse persistante du niveau des eaux souterraines (voir également fig. 3.3), il fut nécessaire durant le mois de juin 1976 d'irriguer ou d'arroser les terrains de culture dans presque tout le bassin du Rhin; c'est en effet pendant ce mois que les cultures ont le plus besoin d'eau. L'eau nécessaire à cette irrigation a été en partie prélevée dans les nappes et en partie dans les cours d'eau ce qui a entraîné immédiatement une baisse correspondante de l'écoulement de ceux-ci. Par contre, pour les eaux souterraines, ces pompes n'ont entraîné une baisse de l'écoulement que quelques semaines à quelques mois plus tard, en raison de la dépendance de l'écoulement de base par rapport au volume déstocké.

La sécheresse a entraîné accessoirement un besoin accru en eau. Etant donné le plus grand nombre d'heures d'ensoleillement et les températures élevées, ces besoins ont été plus grands, et pas seulement pour l'agriculture; il ne faut pas oublier l'approvisionnement en eau potable et industrielle, ainsi que l'approvisionnement en eau de refroidissement.

La figure 3.5 présente les hydrogrammes de la période d'octobre 1975 à janvier 1977 au niveau des 5 stations de mesure du débit du Rhin déjà prises en compte (par. 3.1). La figure montre aussi l'évolution de la différence entre les débits de Lobith et ceux de Rheinfelden. Sur cette figure sont également indiqués les débits mensuels moyens de la période 1931 à 1980. La différence négative entre les débits de Lobith et ceux de Rheinfelden est due au temps d'écoulement; ce temps est d'environ 5 jours.

Pour le mois de juillet 1976, les valeurs de la figure 3.5 ont été indiquées dans le tableau 3.2, qui donne également les surfaces des bassins versants des 5 stations de mesure et leur pourcentage par rapport à l'ensemble du bassin du Rhin à Lobith. Ce tableau montre clairement l'influence importante que la zone alpine, par rapport à sa surface faible, a eu sur l'écoulement du Rhin: en juillet, la différence des débits moyens entre Lobith et Rheinfelden n'était que de 67 m³/s.

Das Frühjahr 1976 war weiterhin durch eine große Zahl von Sonnenscheinstunden und durch hohe Durchschnittstemperaturen gekennzeichnet. So schien die Sonne im Juni in Metz und Nancy mehr als 300 Stunden, während das Mittel der Reihe 1951 bis 1975 etwa 225 Stunden beträgt. Die Temperaturen in Metz und Straßburg lagen im Juni durchschnittlich 2°C über dem Mittelwert der Periode 1921 bis 1950. Dies hatte eine wesentlich höhere potentielle Verdunstung als normal zur Folge; durch Wassermangel war die tatsächliche Verdunstung dagegen kleiner als normal.

Wegen des bereits seit vielen Jahren anhaltenden Absinkens des Grundwasserspiegels (s. auch Abb. 3.3), war es fast im gesamten Einzugsgebiet des Rheins notwendig, die landwirtschaftlich genutzten Flächen im Monat Juni 1976 künstlich zu bewässern oder zu beregnen; der maximale Wasserbedarf der meisten Kulturen fällt in diesen Zeitraum. Das für diese Bewässerung bzw. Beregnung benötigte Wasser wurde teils dem Grundwasser, teils dem Oberflächenwasser entzogen. Letzteres hatte unmittelbar einen Rückgang des Abflusses zur Folge. Bei Grundwasserentzug tritt dagegen die Abflußverminderung erst einige Wochen bis einige Monate später ein, was auf die Abhängigkeit des Basisabflusses von der Grundwasserspeicherung zurückzuführen ist.

Ein Nebenaspekt der Trockenheit war die Zunahme des Wasserbedarfs. Wegen der vielen Sonnenscheinstunden und hohen Temperaturen bestand ein entsprechend höherer Wasserbedarf, und das nicht nur in der Land- und Forstwirtschaft. Auch in der Trink-, Brauch- und Kühlwasserversorgung war der Wasserbedarf größer.

Abbildung 3.5 zeigt für die Periode Oktober 1975 bis Januar 1977 die Abflußganglinien der gleichen 5 Abflußmeßstationen des Rheins, deren Abflüsse bereits weiter oben verglichen wurden (Abs. 3.1). In der Abbildung ist ebenfalls der Verlauf der Differenz zwischen den Abflüssen für Lobith und Rheinfelden dargestellt. In der gleichen Abbildung sind ferner die Monatsmittelwerte der Abflüsse für den Zeitraum 1931 bis 1980 aufgetragen. Die negative Differenz zwischen den Abflüssen für Lobith und Rheinfelden wird durch die Laufzeit bedingt; diese beträgt etwa fünf Tage.

Für den Monat Juli 1976 sind die Werte aus Abbildung 3.5 in Tabelle 3.2 zusammengefaßt. Hierin sind auch die Flächen der Einzugsgebiete der 5 Pegel und ihr Verhältnis zum gesamten Einzugsgebiet des Rheins oberhalb von Lobith angegeben. Aus dieser Tabelle geht deutlich der große Einfluß hervor, den das Alpengebiet im Verhältnis zu seinem Flächenanteil auf den Abfluß des Rheins hatte: im Juli betrug die Differenz zwischen den mittleren Abflüssen von Lobith und Rheinfelden nur 67 m³/s.

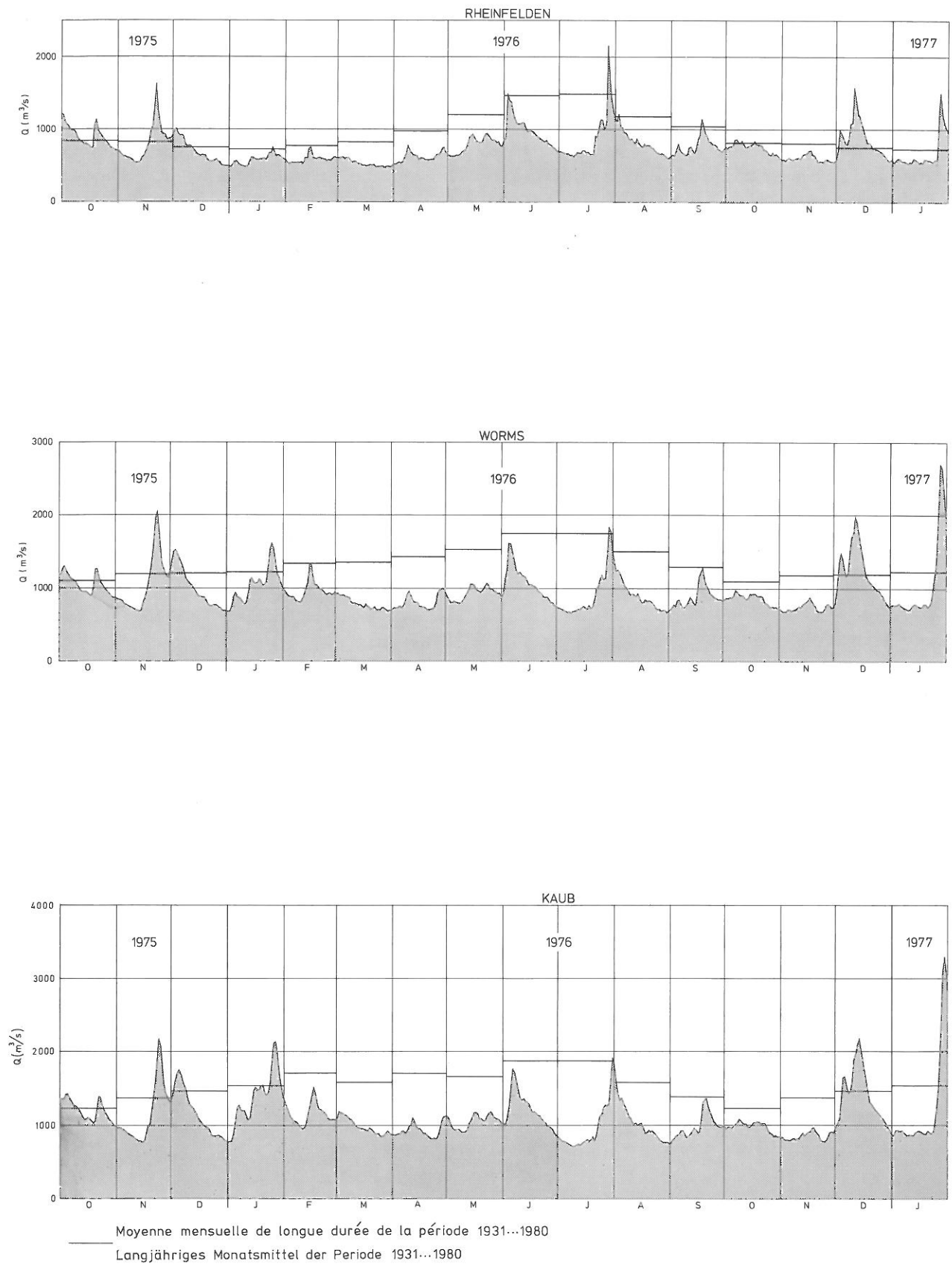
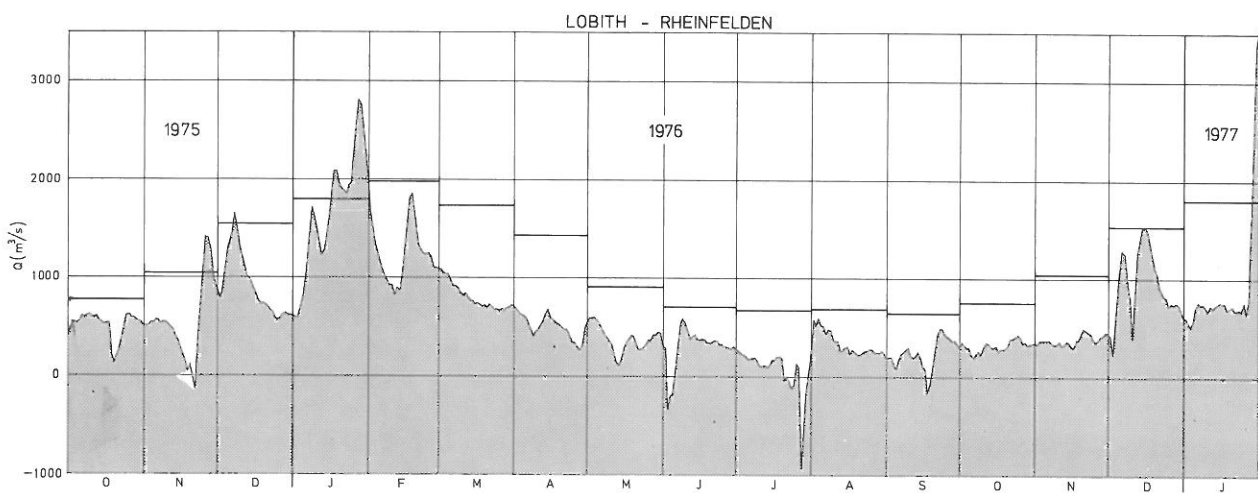
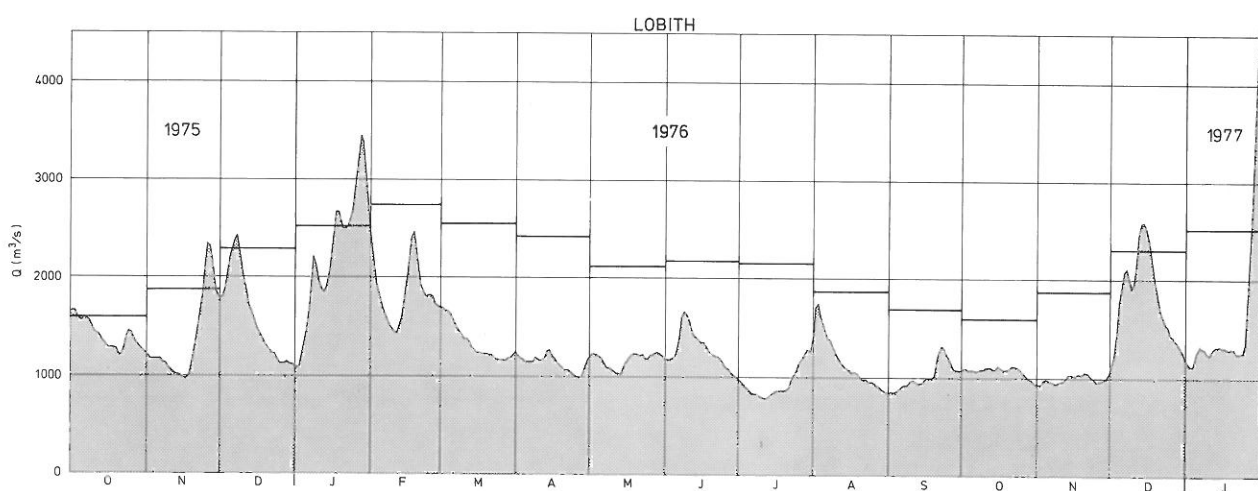
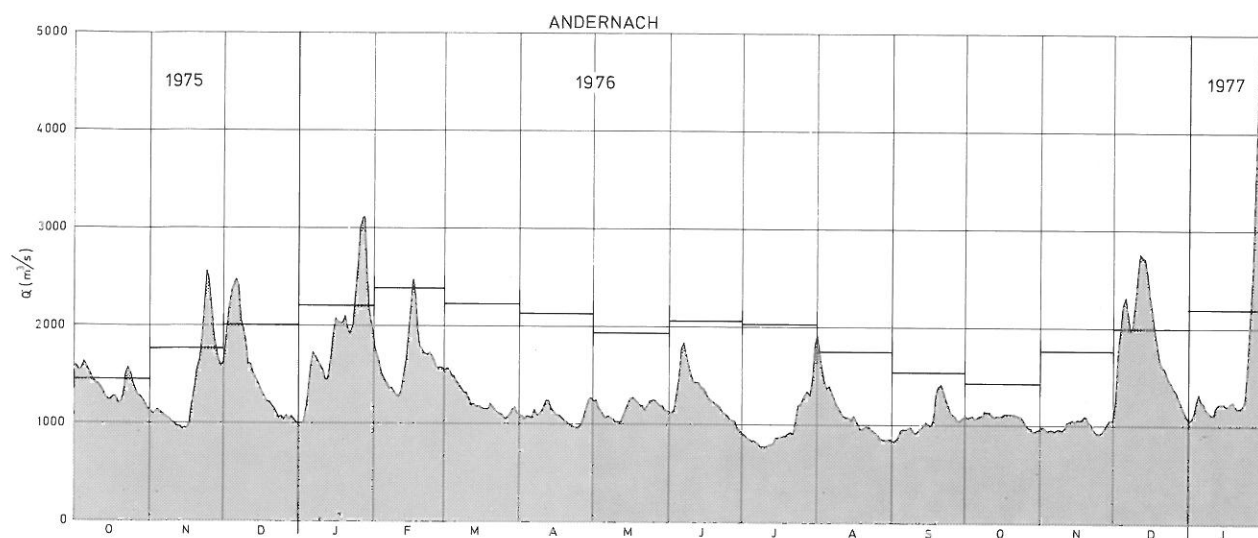


Fig. 3.5 Hydrogramme pour la période d'octobre 1975...janvier 1977 et débits moyens mensuels à Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach et Lobith et pour Lobith moins Rheinfelden pour la période 1931...1980.

Abb. 3.5 Abflussganglinien für den Zeitraum Oktober 1975...Januar 1977 und langjährige mittlere Monatsabflüsse für die Periode 1931...1980 für Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach, Lobith und für Lobith minus Rheinfelden.



Moyenne mensuelle de longue durée de la période 1931...1980

Langjähriges Monatsmittel der Periode 1931...1980

Fig. 3.5 Hydrogramme pour la période d'octobre 1975...janvier 1977 et débits moyens mensuels à Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach et Lobith et pour Lobith moins Rheinfelden pour la période 1931...1980.

Abb. 3.5 Abflußganglinien für den Zeitraum Oktober 1975...Januar 1977 und langjährige mittlere Monatsabflüsse für die Periode 1931...1980 für Rheinfelden, Worms, Kaub, Andernach, Lobith und für Lobith minus Rheinfelden.

Station hydrométrique Meßstation	Surface du bassin Einzugsgebiet		Débit moyen de longue durée de juillet (1931...1980) Langjähriges Mittel des Juli- abflusses (1931...1980)		Débit moyen de juillet 1976 Mittlerer Abfluß Juli 1976	
	km ²	en % de la surface totale	m ³ /s	en % de Lobith	m ³ /s	en % de Lobith
		in % der Gesamtfläche		in % von Lobith		in % von Lobith
Rheinfelden	34 550	21	1480	68	886	93
Worms	68 936	43	1750	80	907	95
Kaub	103 729	65	1880	86	967	101
Andernach	139 795	87	2050	94	1010	106
Lobith	160 800	100	2180	100	953	100
Lobith-Rheinfelden	126 250	79	700	32	67	7

Tab. 3.2 Pourcentage des surfaces et des débits de quatre stations de mesure par rapport à celle de Lobith

Les débits observés à la station d'Andernach ne concordent pas avec les valeurs correspondantes de la station de Lobith. L'écart entre les débits équivalents mesurés aux deux stations résulte de la différence des méthodes de mesure et d'exploitation. Les mesures effectuées en République fédérale d'Allemagne donnaient pour l'année 1976 des débits un peu plus importants que ceux calculés aux Pays-Bas. C'est pourquoi on peut en conclure que le débit à la station de Lobith est comparable à celui à la station d'Andernach. Entre temps, les méthodes allemande et néerlandaise ont été ajustées, de sorte que de telles différences ne se produisent plus.

Bien que, en raison des faibles précipitations, le débit du Rhin à Rheinfelden ait été notablement en retrait par rapport à la moyenne de longue durée, sa contribution à l'écoulement dans la zone aval a cependant été plus importante que jamais, grâce à l'apport dû à la fonte des glaciers.

Fin juillet 1976, les précipitations se sont généralisées à l'ensemble du bassin. Elles ont permis la reconstitution du taux d'humidité du sol. Par contre, les réserves en eau souterraine n'ont pu être reconstituées, si bien que l'écoulement de surface a rechuté à sa valeur antérieure dès la fin des pluies.

A partir de septembre, les précipitations ont atteint des valeurs sensiblement égales à celles de la moyenne de la période, mais, tout juste suffisantes pour faire augmenter légèrement l'écoulement et l'humidité du sol. C'est seulement à partir de décembre 1976 que l'augmentation du débit a été plus marquée du fait de précipitations plus abondantes. L'eau souterraine a, elle aussi, pu être renouvelée à partir de cette période. Dans certaines régions cependant, il a fallu attendre fin 1977 et même 1978 pour que l'eau souterraine retrouve son niveau d'octobre 1975. A Hoenderloo, même en 1981, ce niveau n'était pas encore atteint (fig. 3.3).

Tab. 3.2 Gegenüberstellung der Einzugsgebietsflächen und der Abflüsse von vier Meßstationen mit Lobith

Die Abflüsse, beobachtet am Pegel Andernach, stimmen mit den entsprechenden Werten am Pegel Lobith nicht überein. Der Unterschied der Abflüsse zwischen den beiden Pegeln ist durch die verschiedenen Meß- und Auswertemethoden bedingt. Nach dem in der Bundesrepublik Deutschland angewandten Verfahren ergaben sich für 1976 etwas größere Abflüsse als nach dem niederländischen. Deshalb kann davon ausgegangen werden, daß die Abflüsse am Pegel Lobith und am Pegel Andernach gleichwertig sind. Unterdessen wurden die deutsche und die niederländische Methode aufeinander abgestimmt, so daß solche Unterschiede nicht mehr auftreten.

Obwohl der Abfluß bei Rheinfelden wegen geringer Niederschläge bedeutend hinter dem langjährigen Mittel zurückblieb, war er für das stromabwärtsgelegene Gebiet aufgrund der Gletscherschmelzwasser bedeutsamer als je zuvor.

Ende Juli 1976 begann es im gesamten Einzugsgebiet zu regnen. Dieser Niederschlag sorgte für eine Ergänzung der Bodenfeuchte; das Grundwasser wurde jedoch noch nicht ergänzt. Der Abfluß ging deshalb nach der Regenperiode schnell wieder auf das Niveau von Juli 1976 zurück.

Ab September erhöhte sich der Niederschlag auf Werte, die jeweils dem langjährigen Mittel entsprachen. Dennoch war dieser Niederschlag gerade ausreichend, um der Abfluß ein wenig ansteigen zu lassen und den Bodenfeuchtegehalt zu vergrößern. Erst ab Dezember 1976 konnte der Abfluß infolge noch größerer Niederschläge stärker ansteigen. Auch das Grundwasser wurde erst ab Dezember ergänzt. In einigen Gebieten sollte es jedoch noch bis weit in das Jahr 1977 und manchmal sogar bis ins Jahr 1978 dauern, bevor das Grundwasser wieder den Stand vom Oktober 1975 erreicht hatte. In Hoenderloo wurde der Stand selbst in 1981 noch nicht erreicht (Abb. 3.3).

4. CONSIDÉRATIONS STATISTIQUES

4.1 Régime hydrologique en étiage

Le régime du Rhin est surtout marqué par le régime nival des Alpes et par l'influence régulatrice des lacs préalpins. La formation d'eau et de réserves d'eau sous forme de glace et de neige en hiver ainsi que les fontes en été ont une influence décisive sur les étiages. Avec l'accroissement du bassin versant les zones à régime pluvial prennent de l'importance. On trouve une description générale des étiages dans la Monographie du bassin du Rhin. Il n'est question ici que de mentionner les différentes augmentations de débits avec l'accroissement du bassin versant (voir fig. 4.1). Tandis que, pour des débits moyens et particulièrement lors des crues, les grands affluents tels que le Main et la Moselle règlent le régime en hiver, ce sont les eaux provenant de la fonte des neiges des Alpes qui dominent le régime du fleuve en été. C'est pour cela qu'à Bâle les étiages ont lieu pendant les mois de janvier et février. En aval, sous l'influence des affluents, la période des étiages se déplace en octobre. La figure 4.2 montre les moyennes minimales sur plusieurs jours à différentes stations du Rhin desquelles on peut déduire l'importance du débit moyen d'étiage de différentes durées. Le débit augmente avec l'accroissement du bassin versant ainsi qu'avec la durée de la période d'étiage.

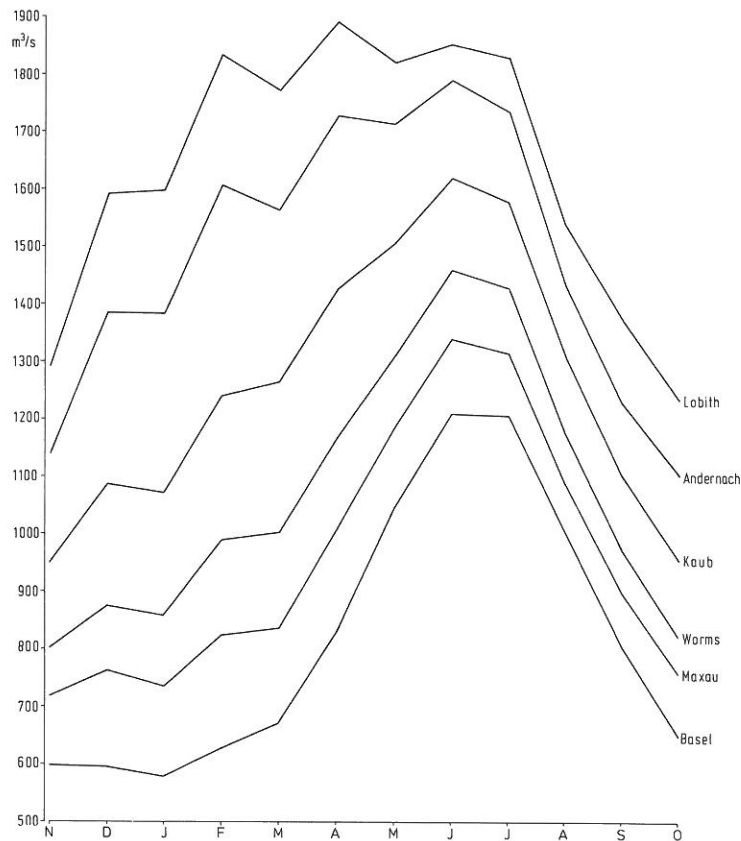


Fig. 4.1 Débits moyens mensuels d'étiage pour quelques stations rhénanes pour les années 1951...1980.

4. STATISTISCHE BETRACHTUNGEN

4.1 Abflußregime bei Niedrigwasser

Das Abflußgeschehen des Rheins wird wesentlich durch das nivale Regime der Alpen und die ausgleichende Wirkung der Alpenrandseen geprägt. Das Niedrigwasser wird entscheidend beeinflusst durch Wasser- und Wasservorratsbildung in Form von Eis und Schnee im Winter und Abschmelzvorgängen im Sommer. Mit zunehmender Einzugsgebietsgröße erhöht sich auch der Anteil der Flächen, die vom direkten Abfluß aus Niederschlägen beherrscht werden. Eine allgemeine Beschreibung der Niedrigwasserverhältnisse befindet sich in der Monographie für das Rheingebiet. Hier soll lediglich auf die unterschiedliche Abflußzunahme hingewiesen werden, die sich mit zunehmendem Einzugsgebiet ergibt (s. Abb. 4.1). Während bei mittleren Abflüssen, ganz besonders jedoch bei Hochwasser, die großen Nebenflüsse wie Main und Mosel, das Abflußgeschehen im Winter bestimmen, beherrschen die abschmelzenden Wasservorräte aus den Alpen die Abflußverhältnisse im Sommer. Durch diese Naturgegebenheiten tritt im Mittel das Niedrigwasser in Basel in den Monaten Januar und Februar auf. Flußabwärts verschiebt sich dieser Zeitpunkt in den Oktober durch die Wirkung der Nebenflüsse. In Abb. 4.2 sind die kleinsten Mehrtagesmittel an verschiedenen Pegeln des

Abb. 4.1 Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse für verschiedene Rheinpegel der Jahre 1951...1980.

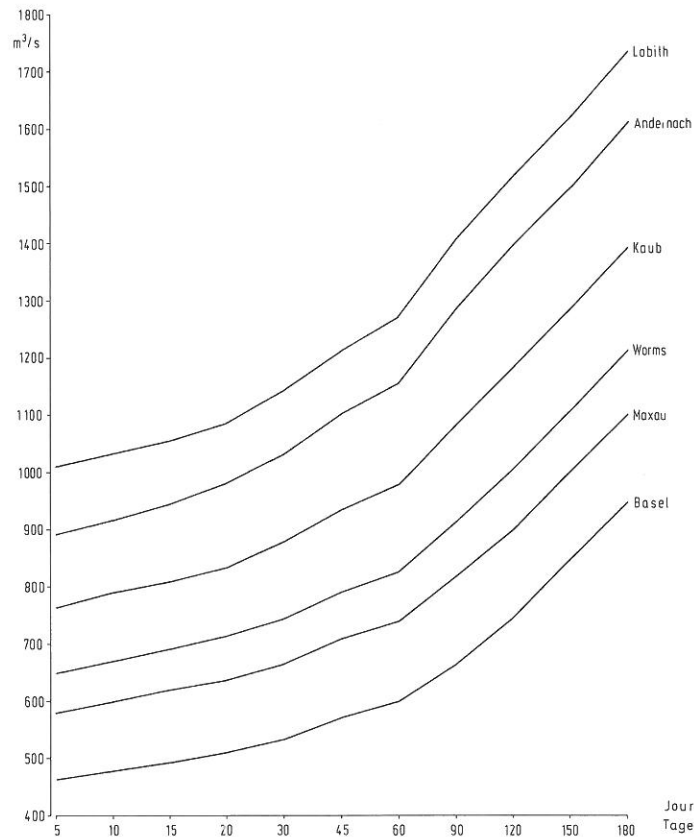


Fig. 4.2 Valeurs moyennes minimales des débits sur plusieurs jours pour quelques stations rhénanes pour les années 1951...1980.

Abb. 4.2 Kleinste Mehrtagesmittelwerte der Abflüsse für verschiedene Rheinpegel der Jahre 1951...1980.

4.2 Données

Pour pouvoir juger les étiages on a utilisé les données de différentes stations qui, par leur position et la période d'observation, ont une certaine importance. Pour le système fluvial du Rhin il suffit d'examiner de grands bassins versants partiels. C'est pour cela qu'on a limité les calculs détaillés à 12 stations importantes (tab. 4.1).

L'emplacement des stations est indiqué dans l'annexe 2. Des détails figurent sur la liste des stations de la Monographie du bassin du Rhin [CHR/KHR, 1978, Tab. B.3.2].

Pour les études statistiques on a utilisé les débits moyens journaliers des différentes stations. Ces données ont été mises sur supports, contrôlées et stockées dans une banque de données, ce qui a représenté un travail considérable.

Rheins dargestellt, aus der die Größe des mittleren Abflusses unterschiedlich langer Niedrigwasserperioden ablesbar ist. Sie nimmt sowohl mit der Größe des Einzugsgebietes als auch mit der Dauer der Niedrigwasserperiode zu.

4.2 Datenmaterial

Zur Beurteilung der Niedrigwasserhältnisse wurden die Daten von verschiedenen Pegeln herangezogen, die aufgrund ihrer Lage und ihres Beobachtungszeitraumes von Bedeutung sind. Für das Flußsystem des Rheins genügt hierbei die Untersuchung von großen Teileinzugsgebieten. Es wurden daher die umfangreichen Berechnungen auf zwölf wichtige Pegel beschränkt (Tab. 4.1).

Die Lage der Pegel ist in Anlage 2 dargestellt. Einzelheiten finden sich im Verzeichnis der Pegel der Monographie des Rheingebietes [CHR/KHR, 1978, Tab. B.3.2].

Für die statistischen Untersuchungen wurden die mittleren Tagesabflüsse der einzelnen Pegel benutzt. In sehr umfangreichen Arbeiten wurden diese Daten auf Datenträger gebracht, geprüft und in eine Datenbank eingestellt.

Nr.	Nom Name	Fleuve Gewässer	Bassin versant Einzugsgebiet A_{Eo} (km ²)
1	Schmitter	Rhein	6119
2	Brugg	Aare	11750
3	Basel	Rhein	35925
4	Plochingen	Neckar	4002
5	Schweinfurt	Main	12715
6	Grolsheim	Nahe	4011
7	Kaub	Rhein	103729
8	Kalkofen	Lahn	5320
9	Toul	Moselle	3350
10	Mettlach	Saar	7139
11	Cochem	Mosel	27100
12	Lobith	Rhein	160800

Tab. 4.1 Stations utilisées avec bassin versant

Tab.4.1 Einbezogene Pegel mit Einzugsgebieten

4.3 Vérification de l'homogénéité

Diverses publications [GERHARD, 1979; SPREAFICO, 1980] montrent que des modifications peuvent être constatées en ce qui concerne le régime d'écoulement du Rhin en étiage. Connaissant l'influence de divers travaux d'aménagement, il a été nécessaire de procéder à des analyses de tendances et à des vérifications de l'homogénéité de toutes les données. Ces modifications ont probablement été causées par les travaux d'aménagement suivants:

à partir de 1879: Lors de la première correction des eaux du Jura on a procédé à la dérivation de l'Aar dans le lac de Biene.

à partir de 1920: La construction de bassins d'accumulation débutée dans les Alpes en 1904 et terminée en 1920 provoque une augmentation des débits d'étiage en hiver, particulièrement ressentie depuis 1942.

à partir de 1948: On suppose que les travaux d'aménagement du Rhin supérieur entre Bâle – Strasbourg – Iffezheim ont pour conséquence une légère diminution du débit d'étiage.

D'après SPREAFICO [1980], le débit de grandes parties du bassin versant en territoire suisse est soumis à une influence anthropogène, particulièrement en période de crues et d'étiages. KASSER [1973] montre que les modifications constatées n'ont pas été provoquées uniquement par les travaux d'aménagement précités mais que des changements dans les zones glacières et ainsi des changements climatiques y ont peut être également contribué.

Des courbes cumulées doubles ont été établies pour toutes les stations afin de déterminer les tendances

4.3 Homogenitätsprüfung

In verschiedenen Veröffentlichungen [GERHARD, 1979; SPREAFICO, 1980] wird dargestellt, daß Veränderungen im Abflußverhalten des Rheins bei Niedrigwasser feststellbar sind. Die Kenntnis der Beeinflussung durch verschiedene Maßnahmen machte Trendanalysen und Homogenitätsprüfungen des gesamten Datenmaterials erforderlich. Ursachen für die Veränderungen können folgende wasserwirtschaftliche Maßnahmen sein:

Ab 1879: Im Rahmen der 1. Juragewässerkorrektion wurde die Aare in den Bielersee eingeleitet.

Ab 1920: Der in 1904 beginnende und ab 1920 einsetzende Bau der Speicher in den Alpen bewirkt eine Niedrigwasseraufhöhung im Winter. Dies macht sich besonders seit 1942 bemerkbar.

Ab 1948: Durch die Ausbaumaßnahmen im Oberrhein zwischen Basel – Straßburg – Iffezheim wird eine geringe Verminderung des Niedrigwasserabflusses angenommen.

Nach SPREAFICO [1980] ist der Abfluß großer Teile des Einzugsgebietes auf dem Gebiet der Schweiz, insbesondere bei Hoch- und Niedrigwasser, anthropogen beeinflusst. KASSER [1973] zeigt, daß nicht nur vorstehend erwähnte Baumaßnahmen die festgestellten Änderungen verursachen, sondern es können auch Veränderungen in den vergletscherten Zonen und somit Klimaänderungen beigetragen haben.

Für alle Pegel wurde zur Feststellung von Trends in der Entwicklung des Niedrigwasserabflusses Dop-

de l'évolution du débit d'étiage. Les sommes des valeurs moyennes annuelles ont été comparées aux sommes des moyennes minimales sur plusieurs jours (voir fig. 4.3). A part cela des analyses de tendances ont même été effectuées pour des moyennes journalières minimales établies aux stations de Bâle (voir annexe 6), Maxau, Worms, Kaub, Andernach et Cologne [HERLITZE, 1981] (Voir fig. 4.4.a et b). On a établi comme tendance l'augmentation et la diminution moyenne du paramètre en question sur la période d'observation et rapportée à une année.

Les analyses montrent aux stations du Rhin des tendances tant dans les étiages mensuels moyens d'une année que dans les moyennes minimales sur plusieurs jours. On peut en résumer ainsi:

- augmentation des débits moyens mensuels pendant les mois d'hiver;
- diminution des débits moyens mensuels pendant les mois d'été;
- augmentation des valeurs moyennes minimales sur plusieurs jours aux postes d'observation entre Bâle et Kaub.

La tendance positive significative à la station de Bâle s'amenuise en aval du fleuve avec l'accroissement du bassin versant. Il faut donc chercher la cause de cette tendance dans les travaux d'aménagement en amont de Bâle. Aux stations de Schweinfurt et de Cochem on a constaté des tendances qui ont une influence capitale sur les calculs statistiques. Aux stations des autres affluents on n'a pas constaté de tendance significative.

4.4 Probabilité d'apparition de basses eaux

Les analyses de tendances et d'homogénéité ont montré que, depuis le début des observations effectuées, les étiages sur le Rhin se sont modifiés. C'est pour cela qu'il faut être très critique en ce qui concerne l'utilisation des données pour la période d'observation complète. Il n'est donc pas possible de comparer entre eux les résultats de séries de différentes durées (voir tab. 4.2). C'est la raison pour laquelle les considérations théoriques sur la probabilité ont été basées sur des séries de données plus récentes, ceci à partir de l'année hydrologique 1951. On voulait ainsi obtenir des données homogènes malgré l'influence constatée et pouvoir effectuer une comparaison avec les séries d'observation de courte durée d'autres stations.

pelsummenkurven aufgestellt. Den Summen der Jahresmittelwerte wurden die Summen der kleinsten Tagesmittelwerte gegenübergestellt (s. Abb. 4.3). Darüber hinaus wurden auch für kleinste Mehrtagessmittelwerte, festgestellt an den Pegeln Basel (s. Anl. 6), Maxau, Worms, Kaub, Andernach und Köln [HERLITZE, 1981], Trendanalysen durchgeführt (s. Abb. 4.4.a und b). Ermittelt wurde als Trend die mittlere Zu- bzw. Abnahme des betreffenden Parameters im Untersuchungszeitraum, bezogen auf ein Jahr.

Die Untersuchungen zeigen an den Pegeln des Rheins Trends sowohl bei den mittleren monatlichen Niedrigwassern (MoMNQ) eines Jahres als auch bei den kleinsten Mehrtagessmitteln. Zusammenfassend kann folgendes festgestellt werden:

- Zunahme der mittleren monatlichen Abflüsse in den Wintermonaten;
- Abnahme der mittleren monatlichen Abflüsse in den Sommermonaten;
- Zunahme der kleinsten Mehrtagessmittelwerte bei den Rheinpegeln Basel bis Kaub.

Der signifikante positive Trend am Pegel Basel nimmt rheinabwärts mit größer werdendem Einzugsgebiet ab. Seine Ursache muß daher in den Maßnahmen oberhalb Basel zu suchen sein. An den Pegeln Schweinfurt und Cochem ließen sich Trends feststellen, die auf die statistischen Berechnungen einen wesentlichen Einfluß haben. Für die Pegel an den übrigen Nebenflüssen ergaben sich keine signifikanten Trends.

4.4 Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Niedrigwasser

Die Homogenitäts- und Trendanalysen haben gezeigt, daß sich die Niedrigwasserverhältnisse im Rhein seit Beginn der Beobachtung geändert haben. Die Verwendung der Daten über den gesamten Beobachtungszeitraum muß daher kritisch betrachtet werden. Die Ergebnisse der unterschiedlich langen Reihen können nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden (s. Tab. 4.2). Es wurden aus diesem Grund für die Rheinpegel auch jüngere Datenreihen, und zwar beginnend mit dem Abflußjahr 1951, den wahrscheinlichkeitstheoretischen Betrachtungen zugrundegelegt. Es sollte hiermit erreicht werden, daß das Datenmaterial trotz der festgestellten Beeinflussung möglichst homogen und ein Vergleich mit den kurzen Beobachtungsreihen anderer Pegel möglich ist.

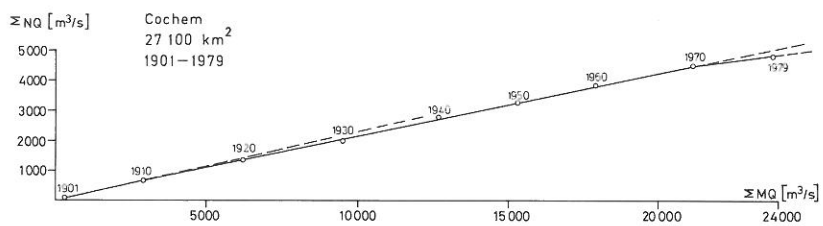
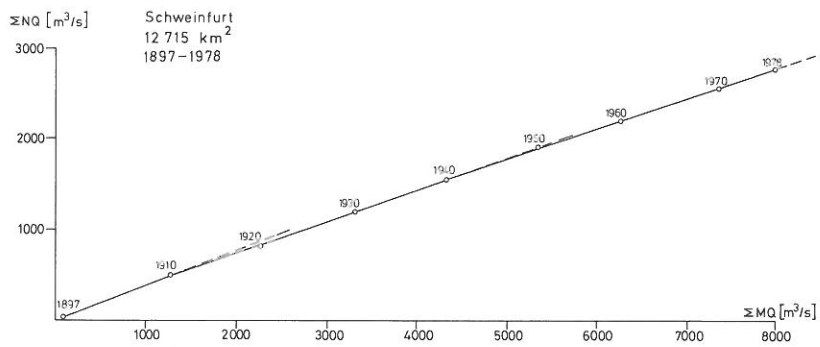
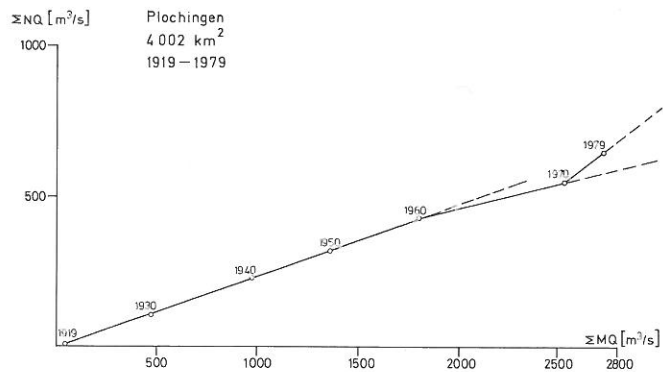
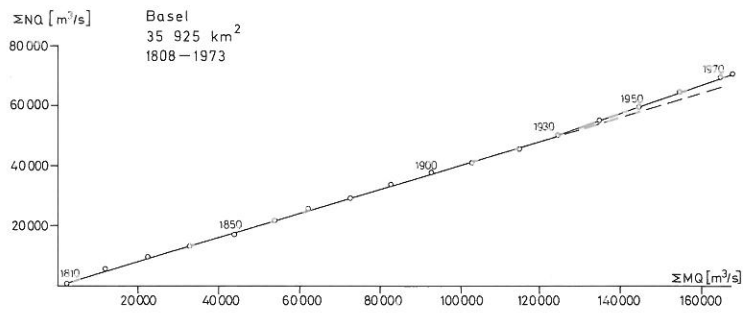


Fig. 4.3 Courbes doubles cumulées des débits aux stations de Bâle, Plochingen, Schweinfurt et Cochem.

Abb. 4.3 Doppelsummenkurven der Abflüsse an den Pegeln Basel, Plochingen, Schweinfurt und Cochem.

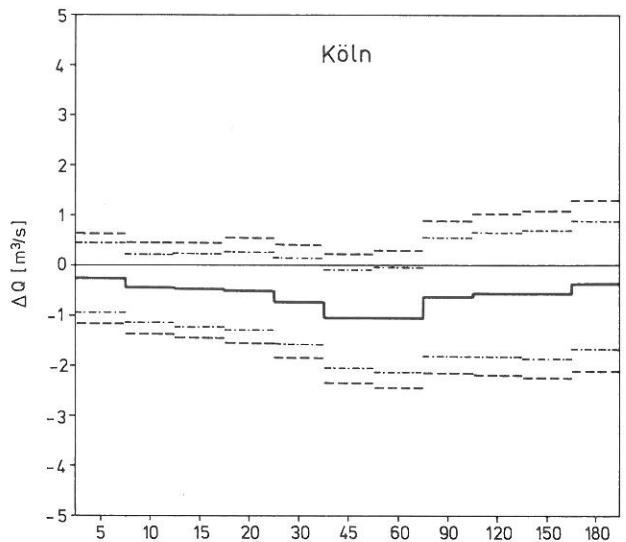
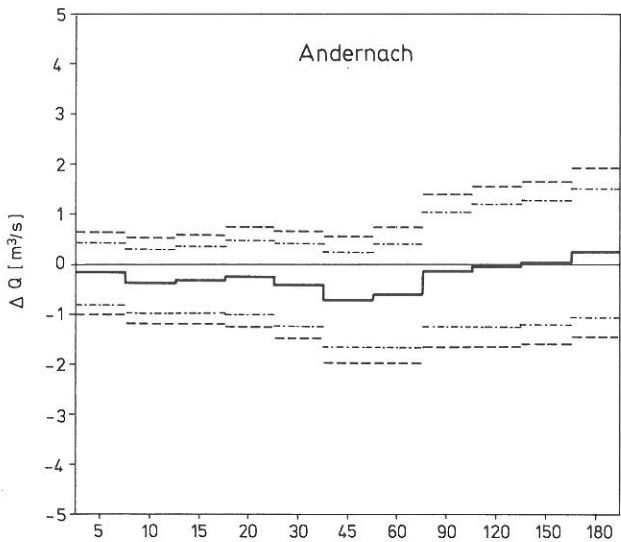
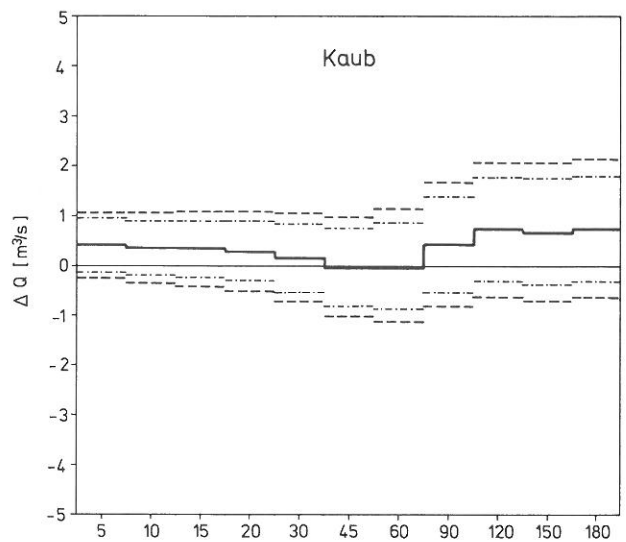
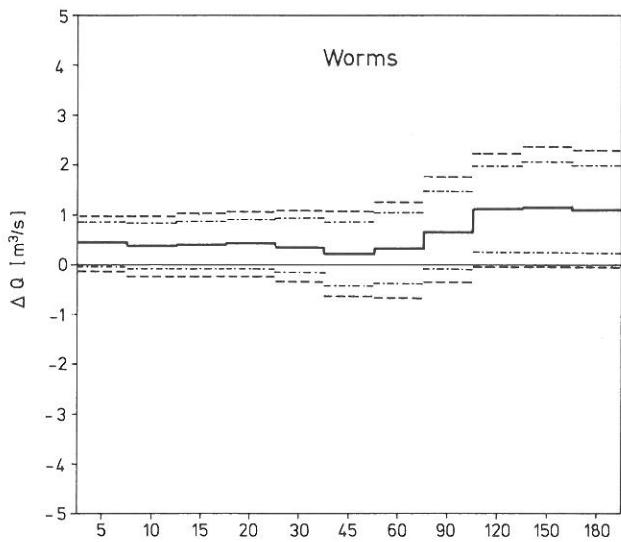
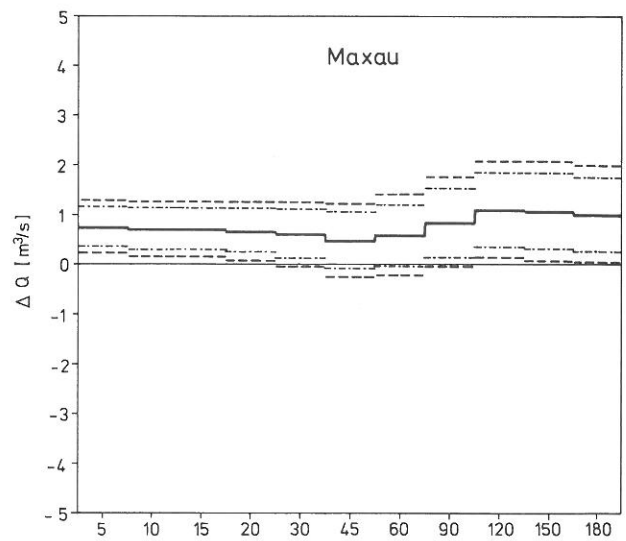
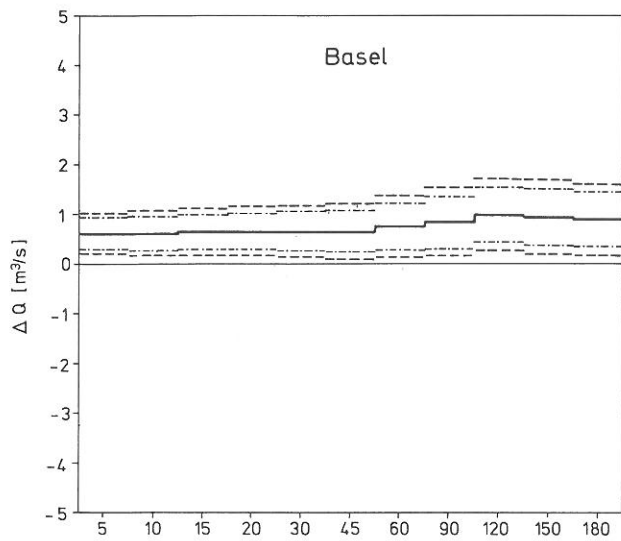


Fig. 4.4.a Tendances et limites de signification (95%, 99%) des plus faibles moyennes sur plusieurs jours de la série 1821...1978.

Abb. 4.4.a Trends mit Signifikanzgrenzen (95%, 99%) für kleinste Mehrtagesmittel der Reihe 1821...1978.

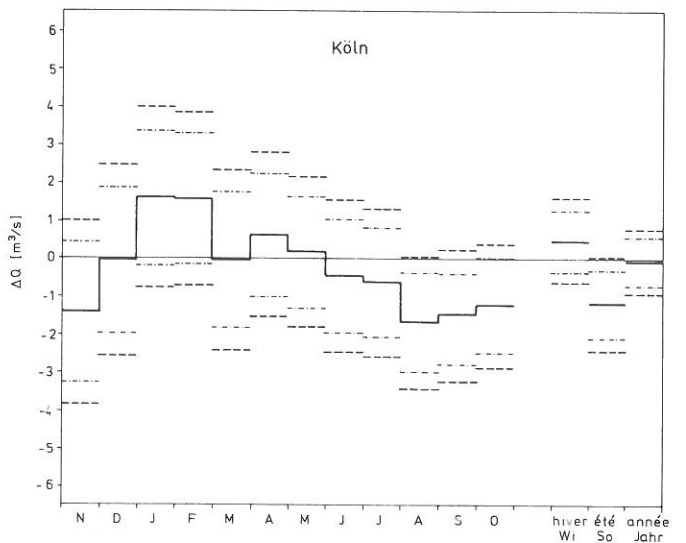
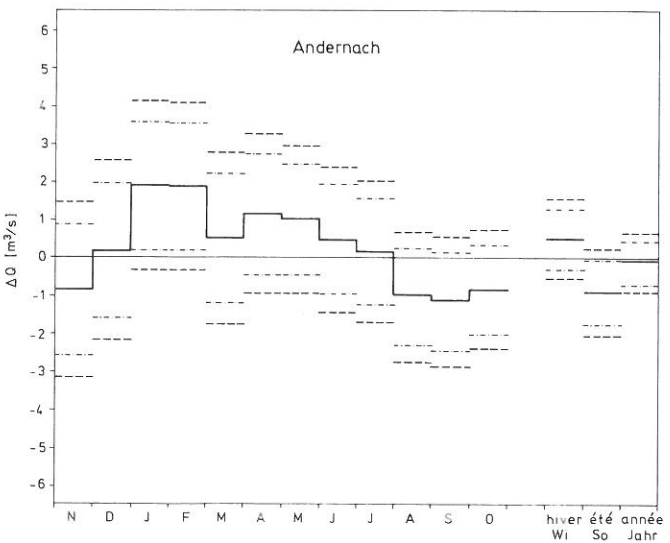
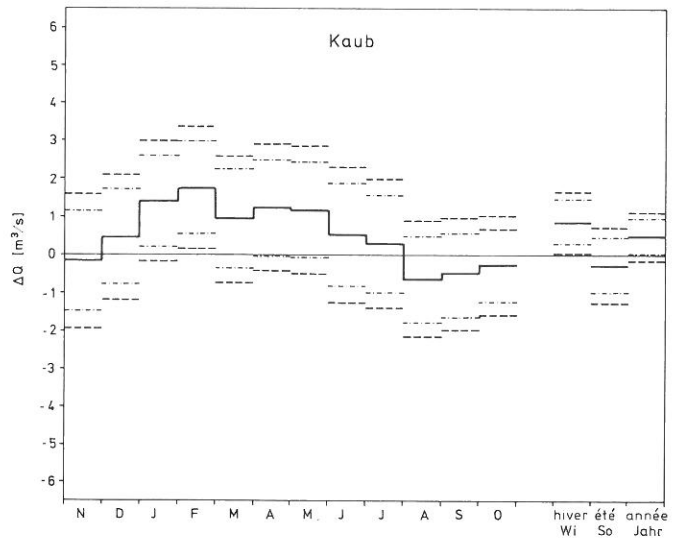
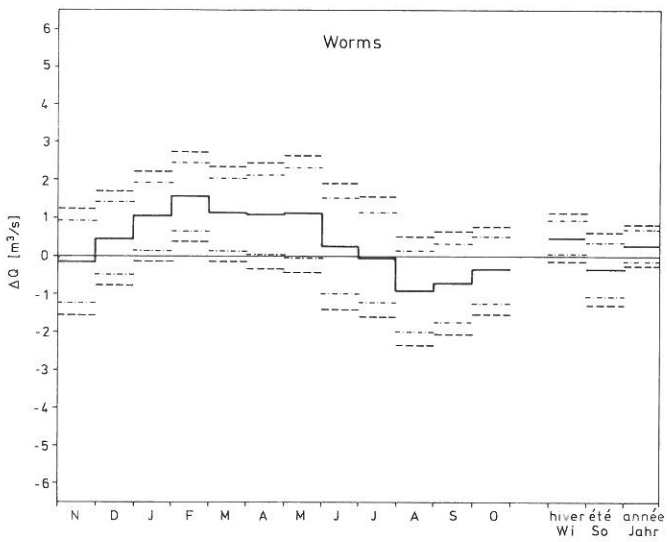
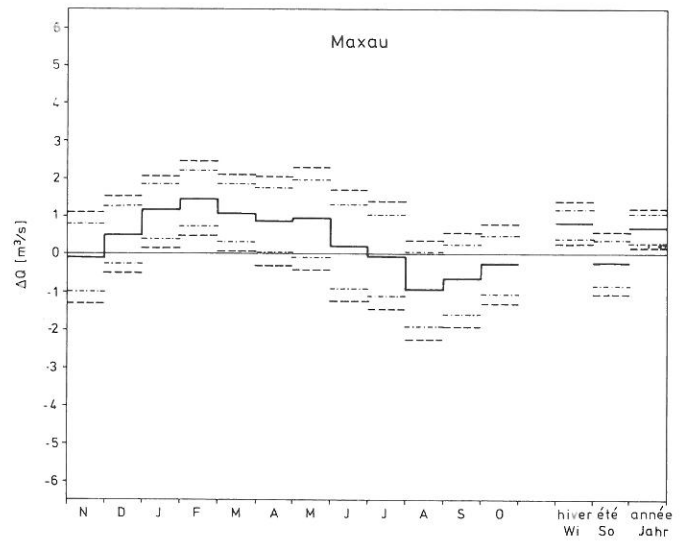
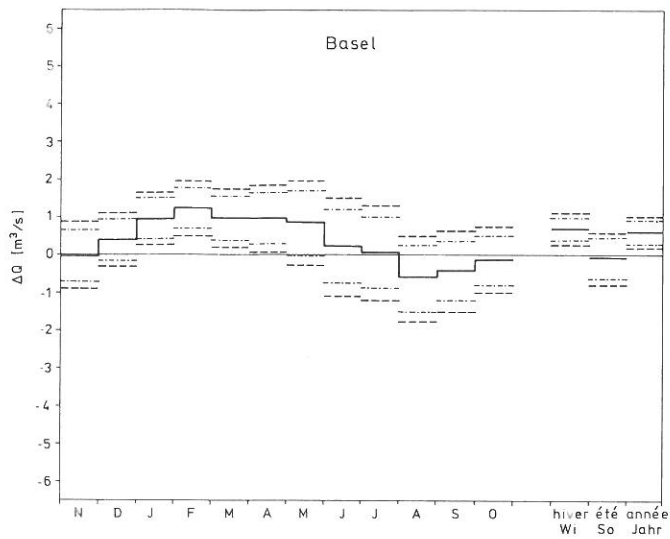


Fig. 4.4.b Tendances et limites de signification (95%, 99%) des moyennes minimales journalières des débits de la série 1821...1978.

Abb. 4.4.b Trends mit Signifikanzgrenzen (95%, 99%) für mittlere niedrigste Tagesmittel der Abflüsse der Reihe 1821...1978.

Station/Fleuve Pegel/Gewässer	A _{E0} km ²	Série Jahresreihe	MQ m ³ /s	MQ _{max} m ³ /s	MQ _{min} m ³ /s	MQ ₁₉₇₆ m ³ /s	NQ m ³ /s	MNQ m ³ /s	NQ ₁₉₂₁ m ³ /s	NQ ₁₉₃₄ m ³ /s	NQ ₁₉₄₇ m ³ /s	NQ ₁₉₆₄ m ³ /s	NQ ₁₉₇₆ m ³ /s
1 Schmitter/Rhein	6119	1955...1978	226	290	158	177	53	70	–	–	–	76	68
2 Brugg/Aare	11750	1951...1976	304	406	198	198	93	137	–	–	–	108	132
3 Basel/Rhein	35925	1809...1974	1025	1473	584	747	201	422	306	409	349	376	491
4 Plochingen/Neckar	4002	1919...1979	45	87	14	29	4	11	4	8	6	8	8
5 Schweinfurt/Main	12715	1897...1978	98	197	41	56	11	34	26	20	18	11	13
6 Grolsheim/Nahe	4001	1935...1973	29	50	13	11	2	4	2	3	2	2	2
7 Kaub/Rhein	103729	1951...1979	1639	2299	1076	1076	525	739	488	583	482	612	713
8 Kalkofen/Lahn	5320	1936...1979	45	76	11	22	3	10	–	–	–	7	3
9 Toul/Moselle	3350	1960...1979	61	92	31	31	3	7	–	–	–	4	3
10 Mettlach/Saar	7139	1952...1979	71	119	36	36	10	18	–	–	–	17	13
11 Cochem/Mosel	27100	1901...1979	302	483	105	140	9	60	25	45	38	20	10
12 Lobith/Rhein	160800	1951...1978	2174	3142	1423	1333	665	978	675	825	640	820	782

Tab. 4.2 Débits caractéristiques des années de sécheresse 1921, 1934, 1947, 1964 et 1976

Tab. 4.2 Charakteristische Abflüsse in den Trockenjahren 1921, 1934, 1947, 1964 und 1976

4.4.1 Courbes de même fréquence de débit

Sur les figures 4.5.a...l est indiquée la fréquence au non-dépassement empirique des débits des différents mois de la série donnée. Les hydrogrammes des valeurs mensuelles minimales de l'année 1976 y sont également représentés.

Il en résulte des phénomènes différents pour les divers bassins fluviaux. Lorsqu'ils sont soumis à l'influence de la fonte des neiges dans les Alpes les débits augmentent pendant les mois d'été; dans le Rhin en aval de l'embouchure de la Moselle, les affluents dont les débits s'amenuisent en été, viennent se superposer à ce phénomène. Il est possible à l'aide de cette représentation, de classer le phénomène individuel de 1976 dans l'ensemble des événements.

A la station Schmitter on voit nettement l'augmentation du débit pendant les mois d'été, due au processus de fonte dans les Alpes. On peut également constater ce phénomène à Brugg sur l'Aar où l'on reconnaît cependant l'influence compensatrice des lacs préalpins. Les phénomènes observés pour le Rhin et l'Aar se superposent à Bâle. En aval du Rhin le régime d'écoulement se transforme et le Rhin prend de plus en plus l'allure typique d'un fleuve de montagnes moyennes d'Europe centrale, avec des débits maximums en hiver en des débits minimums en été. Les graphiques des affluents tels que le Neckar, le Main, la Nahe, la Lahn et la Moselle le montrent clairement. L'événement de basses eaux de 1976 s'intègre très bien dans cet ensemble. La fréquence d'occurrence de cet événement est répartie localement. Dans le haut Rhin il est apparu avec une fréquence de 10–30%, dans l'Aar avec une fréquence de 2,5–10%. Pour les affluents on peut donner une fréquence de 2,5–10%, ce qui a des répercussions sur le Rhin à Lobith.

4.4.1 Linien gleicher Abflußwahrscheinlichkeit

In den Abb. 4.5.a...l ist die empirische Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Abflüsse in den einzelnen Monaten der jeweils angegebenen Jahresreihe dargestellt. Gleichzeitig wurden die Ganglinien der Monatsniedrigstwerte für das Jahr 1976 eingetragen.

Für die einzelnen Flußgebiete ergeben sich unterschiedliche Erscheinungsbilder. Je nach Abhängigkeit vom Abschmelzprozeß in den Alpen nehmen die Abflüsse in den Sommermonaten zu; im Rhein unterhalb der Moselmündung wird dieses Bild überlagert von den Nebenflüssen, in denen in den Sommermonaten die Abflüsse abnehmen. Mittels dieser Darstellung läßt sich das Einzelereignis 1976 in das Gesamtgeschehen einordnen.

Am Pegel Schmitter ist deutlich die Zunahme des Abflusses in den Sommermonaten aufgrund des Schmelzvorganges in den Alpen zu sehen. Dieser Vorgang läßt sich auch noch in Brugg an der Aare feststellen, dort ist aber die ausgleichende Wirkung der Alpenrandseen zu erkennen. In Basel überlagern sich die Erscheinungen von Rhein und Aare. Rheinabwärts ändert sich das Abflußregime des Rheins zunehmend zu einem typischen mitteleuropäischen Mittelgebirgsfluß, in dem die größeren Abflüsse im Winter auftreten, die niedrigsten dagegen im Sommer. Dies zeigen deutlich die Bilder der Nebenflüsse Neckar, Main, Nahe, Lahn und Mosel. Das Niedrigwasserereignis von 1976 paßt sich diesem allgemeinen Bild gut an. Im einzelnen verteilt sich die Häufigkeit des Auftretens dieses Ereignisses lokal. Im Hochrhein trat es mit der Wahrscheinlichkeit von etwa 10–30% auf, in der Aare von 2,5–10%. Für die Nebenflüsse kann allgemein 2,5–10% angegeben werden, was sich insgesamt auf den Rhein in Lobith auswirkt.

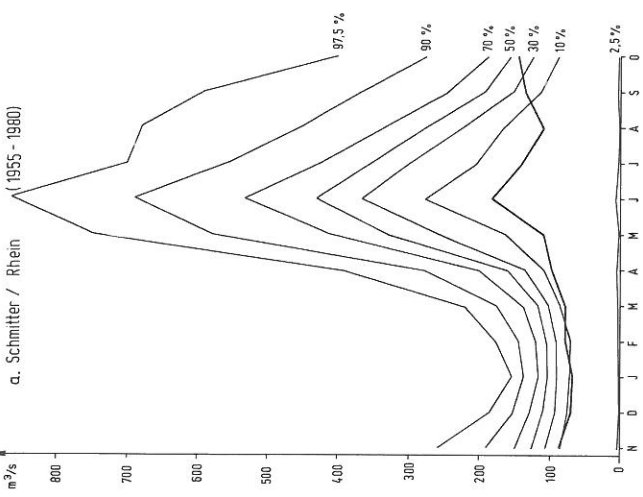
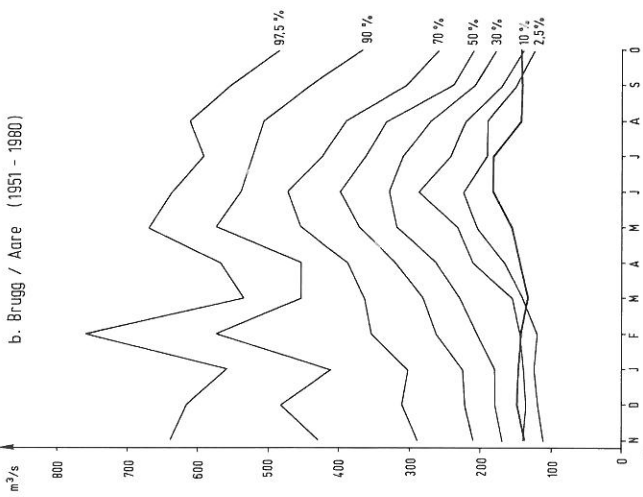
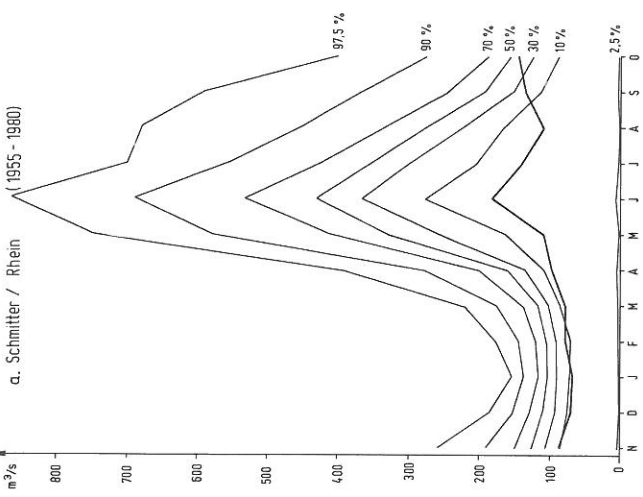
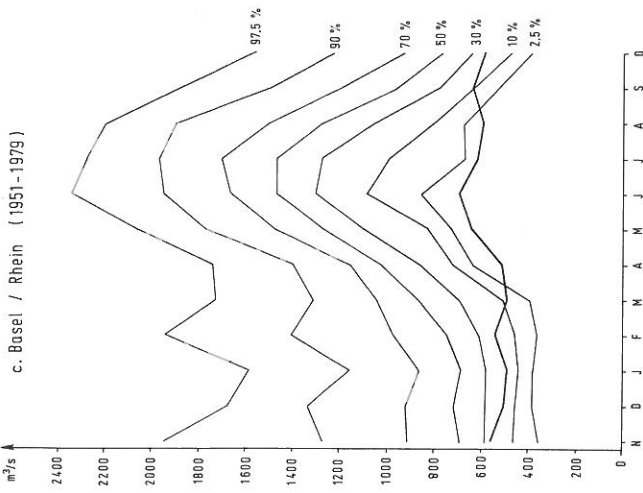
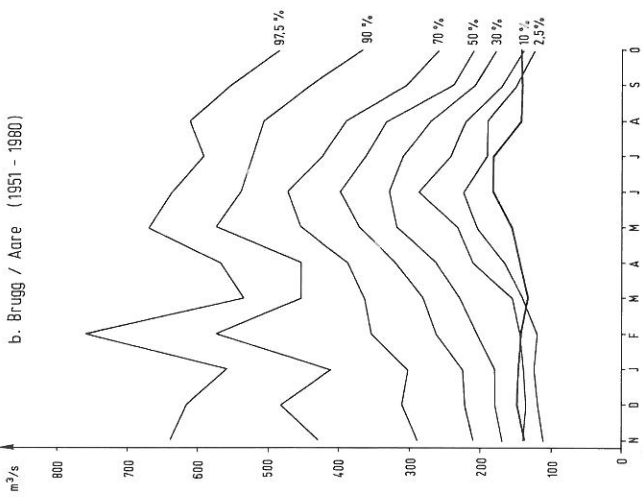
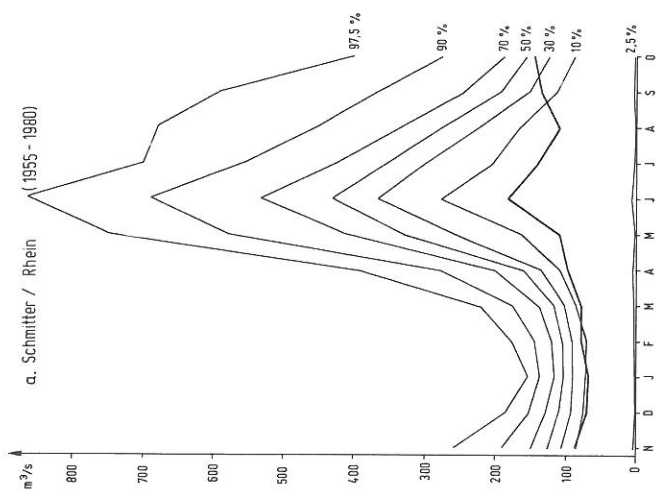


Fig. 4.5 Courbes de même fréquence de débit et valeurs mensuelles minimales de l'année 1976.

Abb. 4.5 Linien gleicher Abflußwahrscheinlichkeit und Monatsniedrigstwerte 1976.

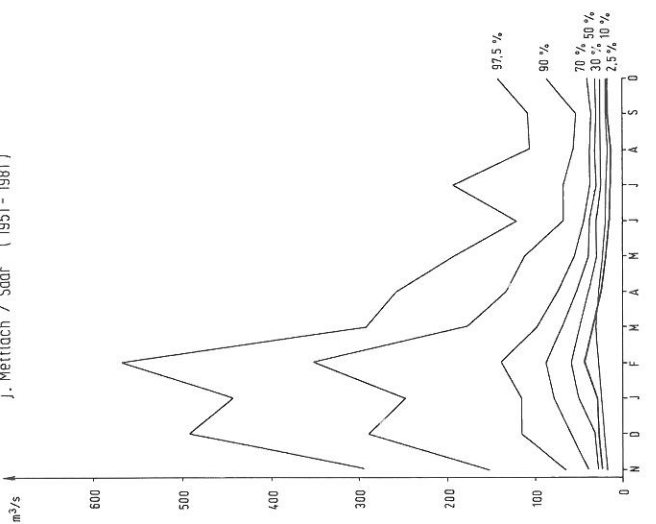
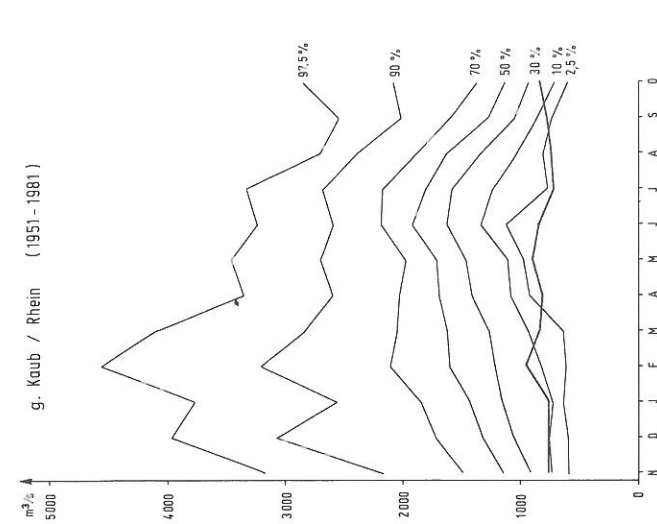
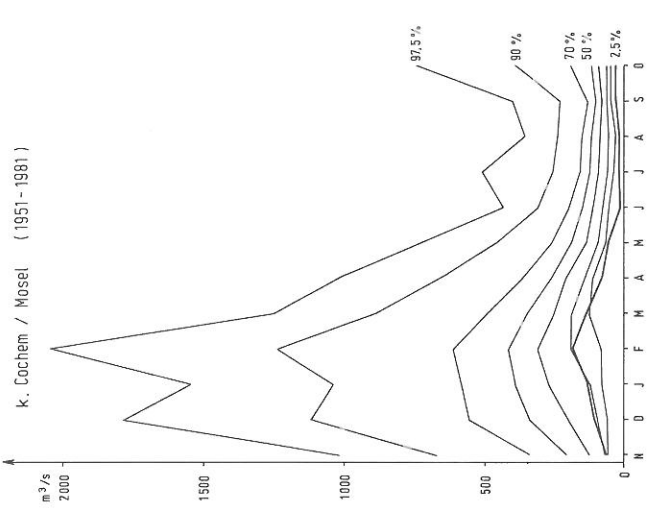
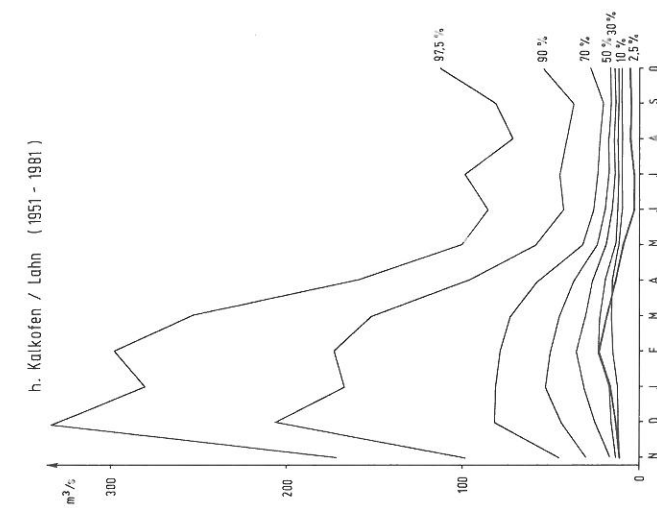
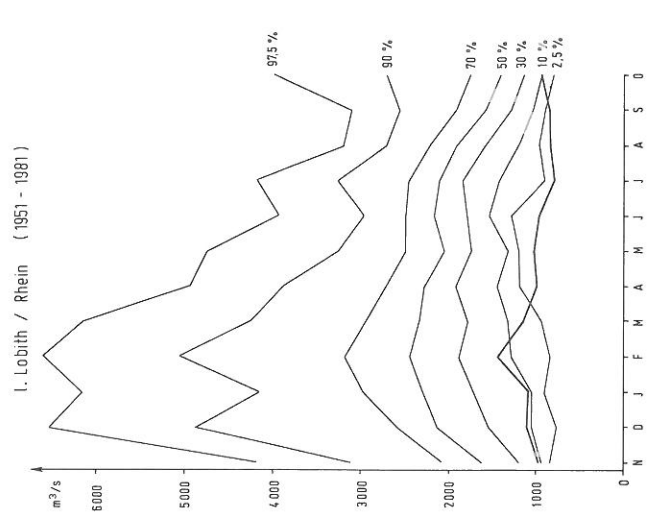
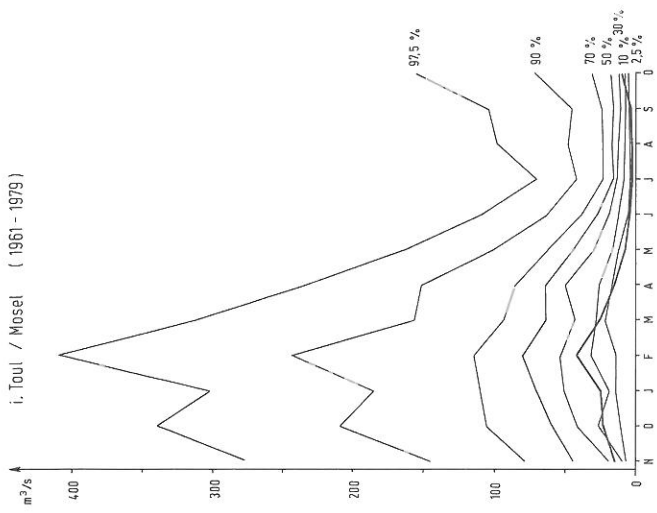


Fig. 4.5 Courbes de même fréquence de débit et valeurs mensuelles minimales de l'année 1976.

Abb. 4.5 Linien gleicher Abflußwahrscheinlichkeit und Monatsniedrigstwerte 1976.

4.4.2 Fonction de répartition

On a également effectué des analyses théoriques de probabilité pour pouvoir juger les débits d'étiage. Les fonctions de répartition suivantes ont été utilisées:

- loi des valeurs extrêmes du type III (Weibull);
- Pearson III;
- log Pearson III;
- loi log des valeurs extrêmes du type III;
- fonction exponentielle.

La distribution des valeurs extrêmes du type III (Weibull) s'est montrée comme étant la mieux adaptée. C'est pourquoi cette fonction a été utilisée dans les calculs de probabilité de toutes les séries.

4.4.3 Fréquences de débits d'étiage moyens

Les figures 4.6.a...l représentent les courbes de même fréquence. Elles débutent aux débits moyens journaliers minimums de 5 jours et se terminent aux valeurs moyennes minimales de 180 jours consécutifs. Pour chaque station, on a intégré dans la représentation de ces courbes de même fréquence, la période de basses eaux de 1976 en tant que distribution empirique. Ainsi il est possible de classer cet événement parmi les fréquences théoriques. Il ne s'agit pas ici d'une exception dans la série de données étudiée [EGGERS, 1979].

A la figure 4.7 on a intégré pour la station de Kaub la distribution empirique des débits d'étiage de 1951 à 1978 de différentes durées. On veut ainsi montrer, à l'aide des figures 4.6.g et 4.7, la relation qui existe entre la distribution empirique et la distribution théorique. A la distribution empirique des périodes de 60 jours de la figure 4.7 correspond la distribution théorique sous forme de ligne perpendiculaire de la figure 4.6.g.

Le genre de représentation choisi pour les figures 4.6.a...l permet de reconnaître deux informations:

- probabilités d'occurrence de périodes de durées différentes;
- distribution de probabilité de périodes d'un certain nombre de jours.

Il s'avère que la période de sécheresse de 1976 devient un phénomène de plus en plus rare, au fur et à mesure que la durée de cette sécheresse augmente.

4.4.2 Verteilungsfunktion

Zur Beurteilung des Niedrigwasserabflusses wurden auch wahrscheinlichkeitstheoretische Untersuchungen angestellt. Hierbei wurden folgende Verteilungsfunktionen angewendet:

- Extremalverteilung Typ III (Weibull);
- Pearson III;
- log Pearson III;
- log Extremalverteilung Typ III;
- Exponentialfunktion.

Die beste Anpassung ergab die Extremalverteilung Typ III (Weibull). Sie wurde daher bei der Berechnung der Wahrscheinlichkeit aller Reihen verwendet.

4.4.3 Wahrscheinlichkeiten mittlerer Niedrigwasserabflüsse

In den Abbildungen 4.6.a...l sind die Linien gleicher Jährlichkeit dargestellt. Sie beginnen bei den kleinsten mittleren Tagesabflüssen von 5 Tagen und enden bei den kleinsten mittleren Werten von zusammenhängenden 180 Tagen. In diese Linien gleicher Jährlichkeiten wurde für jeden Pegel die Niedrigwasserperiode von 1976 als empirische Verteilung in die Darstellung aufgenommen. Es läßt sich daraus dieses Ereignis gut in die theoretischen Wahrscheinlichkeiten einordnen. Es handelt sich hierbei nicht um einen Ausreißer [EGGERS, 1979] in der untersuchten Datenreihe.

In Abbildung 4.7 ist für den Pegel Kaub die empirische Verteilung der Niedrigwasserabflüsse von 1951 bis 1978 mit unterschiedlicher Dauer aufgetragen. Dieses Bild soll in Verbindung mit Abbildung 4.6.g zeigen, welche Beziehung zwischen der empirischen und theoretischen Verteilung besteht. Betrachtet man die empirische Verteilung der 60-Tagesperioden in Abbildung 4.7, so entspricht ihr die theoretische in einer senkrechten Linie in Abbildung 4.6.g.

Die für die Abbildungen 4.6.a...l gewählte Darstellungsart erlaubt das Erkennen zweier Informationen:

- Eintretenswahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Periodenlängen;
- Wahrscheinlichkeitsverteilung von Perioden einer bestimmten Anzahl Tage.

Es zeigt sich deutlich, daß die Niedrigwasserperiode des Jahres 1976 mit zunehmender Dauer zu einem seltener werdenden Ereignis wird.

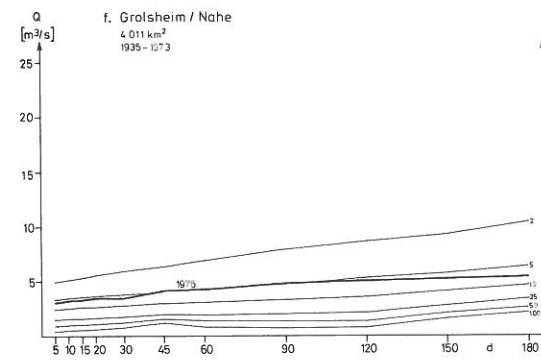
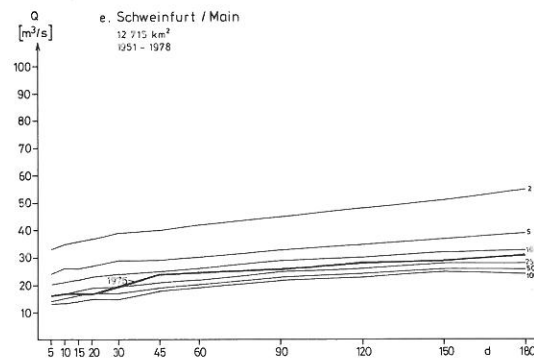
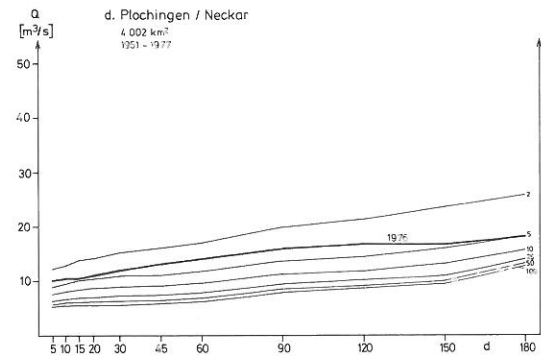
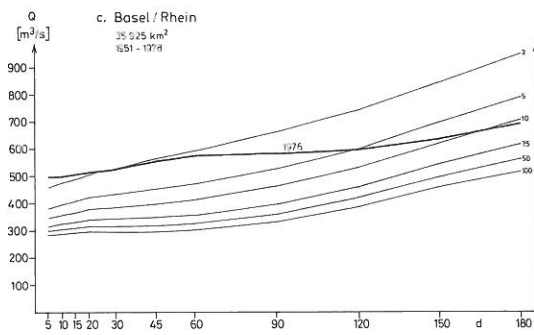
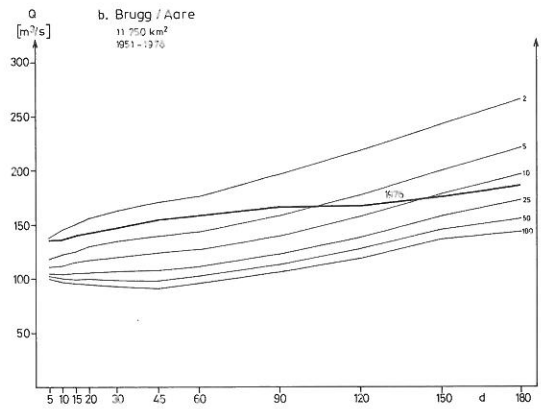
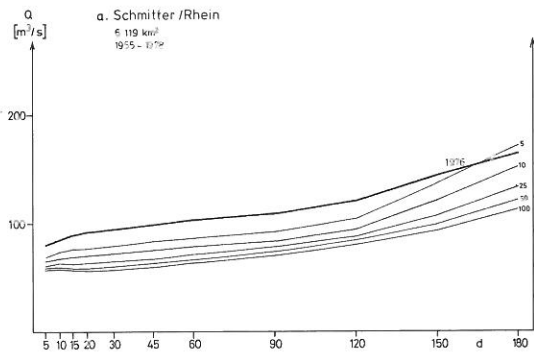


Fig. 4.6 Fréquences de débits moyens minimaux de basses eaux d'après la distribution de Weibull.

Abb. 4.6 Jährlichkeiten kleinster mittlerer Niedrigwasserabflüsse von zusammenhängenden Tagen nach Weibull-Verteilung.

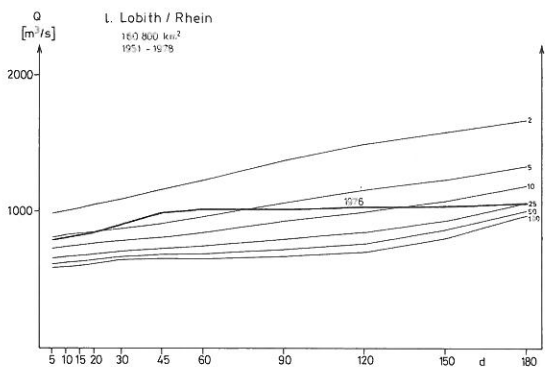
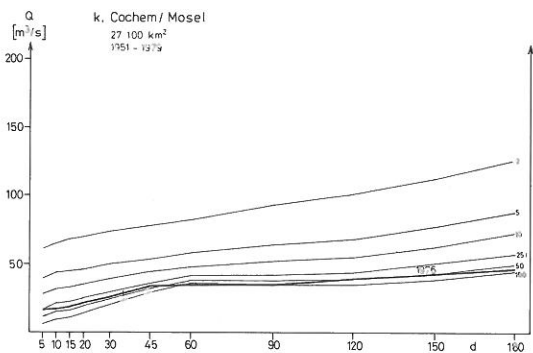
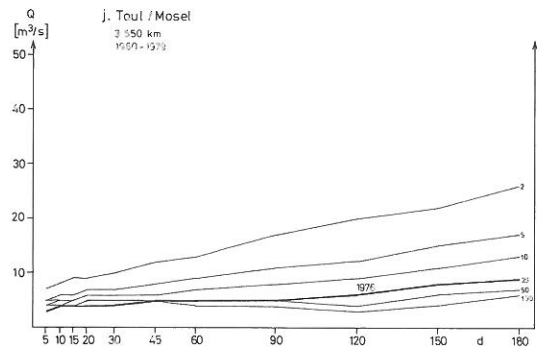
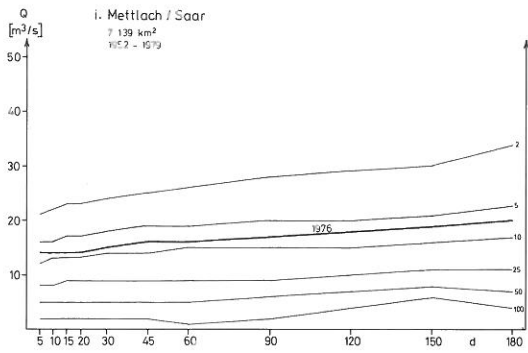
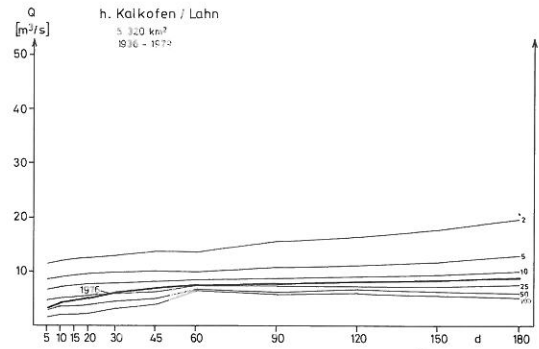
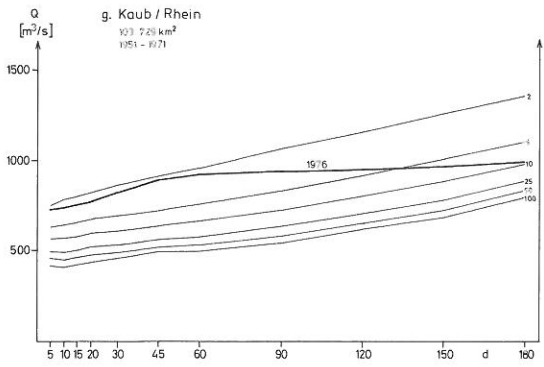


Fig. 4.6 Fréquences de débits moyens minimaux de basses eaux d'après la distribution de Weibull.

Abb. 4.6 Jährlichkeiten kleinster mittlerer Niedrigwasserabflüsse von zusammenhängenden Tagen nach Weibull-Verteilung.

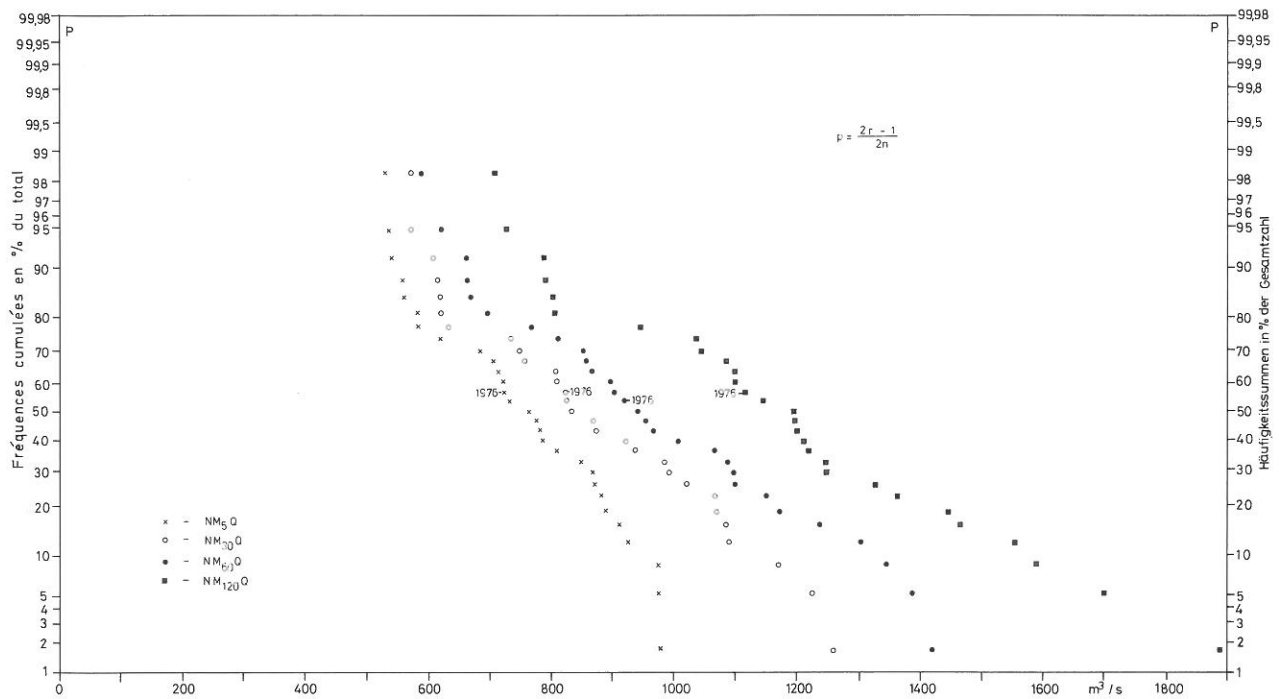


Fig. 4.7 Distribution empirique des débits d'étiage de 1951...1978 de différentes durées pour la station de Kaub.

Abb. 4.7 Empirische Verteilung der Niedrigwasserabflüsse von 1951...1978 mit unterschiedlicher Dauer für den Pegel Kaub.

4.5 Appréciation de la période de sécheresse

Depuis le début de ce siècle, les fluctuations entre les périodes sèches et les périodes humides ont sans cesse augmenté. Les travaux d'aménagement ont influencé les basses eaux moyennes de façon significative tout au moins jusqu'à l'embouchure de la Moselle. Ainsi il est très difficile de se prononcer de façon précise et valable sur l'apparition de périodes de basses eaux. Ceci a été clairement confirmé par les analyses théoriques de fré-

4.5 Beurteilung der Trockenperiode 1976

Seit Beginn dieses Jahrhunderts haben die Schwankungen zwischen trockenen und nassen Perioden ständig zugenommen. Durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen ist das mittlere Niedrigwasser, zumindest bis zur Moselmündung, signifikant beeinflusst worden. Hieraus läßt sich nur schwierig eine allgemeingültige, präzise Aussage über das Eintreten von Niedrigwasserperioden machen. Die wahrscheinlichkeitstheoretischen

Nr.	Station Pegel	Fleuve Gewässer	A _{E0} km ²	Série Reihe	Récurrence moyenne (années)						1976 m ³ /s
					2	5	10	25	50	100	
1	Schmitter	Rhein	6 119	1955...1978	79	68	64	60	59	57	72
2	Brugg	Aare	11 750	1916...1979	139	119	111	105	103	101	135
				1951...1978	138	118	111	105	102	100	
3	Basel	Rhein	35 925	1809...1974	430	350	313	280	263	250	495
				1951...1978	459	384	349	317	299	285	
4	Plochingen	Neckar	4 002	1919...1979	11	8	7	5	5	4	11
				1951...1977	12	9	8	6	6	5	
5	Schweinfurt	Main	12 715	1897...1978	34	27	24	22	21	20	16
				1951...1978	33	24	20	16	14	13	
6	Grolsheim	Nahe	4 011	1935...1973	5	3	2	2	1	0	3
7	Kaub	Rhein	103 729	1951...1979	758	630	563	495	454	420	725
8	Kalkofen	Lahn	5 320	1936...1979	12	9	7	5	3	2	4
9	Toul	Moselle	3 350	1960...1979	7	5	5	4	4	4	3
10	Mettlach	Saar	7 139	1952...1979	21	16	12	8	5	2	14
11	Cochem	Mosel	27 100	1901...1979	66	47	37	27	20	15	16
				1951...1979	61	39	28	17	11	6	
12	Lobith	Rhein	160 800	1951...1978	984	809	729	656	617	587	794

Tab. 4.3 Débits probables de périodes minimales de 5 jours de récurrence moyenne définie (d'après la distribution de Weibull)

Tab. 4.3 Wahrscheinliche Abflüsse kleinster 5-Tagesperioden bestimmter Jährlichkeit (nach Weibull-Verteilung)

quences. Des débits probables de récurrence définie ont été notés pour des périodes de 5 jours dans le tableau 4.3. Pour des raisons d'uniformité on n'a utilisé que la distribution de Weibull.

Dans les considérations statistiques la période de sécheresse apparaît dans les divers bassins partiels avec une récurrence différente. Dans le haut Rhin et le bassin de l'Aar elle peut être classée comme un événement se reproduisant tous les 10–25 ans. Il en est de même pour le Rhin supérieur à la station de Bâle. En aval, aux stations de Kaub et de Lobith par exemple, la récurrence se réduit et va de quelques années à 10 ans. Par contre, dans les montagnes centrales il s'agit d'un événement rare. Là, l'analyse de la période courte est rendu difficile par le fait que les débits d'étiage du Neckar, du Main et de la Moselle sont fortement influencés par les travaux d'aménagement. L'analyse des tendances l'a clairement démontré, surtout pour le Main et la Moselle (cf. fig. 4.3).

D'une analyse statistique des moyennes minimales sur plusieurs jours, il ressort que la période d'étiage de l'année 1976 n'est pas un phénomène rare (voir tab. 4.3). Toutefois, cette période est caractérisée par une baisse rapide des débits en mars et avril et par sa longue durée. Pour l'évaluation de ce phénomène on a déterminé pour la période de mars à août pour les différentes stations les débits moyens probables correspondant à certaines récurrences et on les a comparés aux débits moyens de l'année 1976 (voir tab. 4.4). La période de mars à août, sensible à la sécheresse, est traitée plus en détail dans les chapitres 2 et 3. Il s'avère que, de ce point de vue, la période étudiée pour 1976 était un phénomène très rare. En ce qui concerne la station de Lobith, on peut dire que la période de récurrence pour les débits considérés est de 150 ans environ. De plus, il ressort du tableau 4.4 que la période de récurrence moyenne des débits de 150 ans à la station de Lobith, dans la période de mai à août est provoquée par une coïncidence de débits des affluents du Rhin, qui ont tous, à l'exception du Neckar, une période de récurrence plus courte (25 à 50 ans). Les événements relativement rares dans les différents sous-bassins ont donc mené ensemble à un événement extrêmement rare pour tout le bassin du Rhin. Par conséquent, l'importance de la période d'étiage de l'année 1976 n'est pas due aux débits faibles, mais à une coïncidence de différents facteurs: les débits faibles ont commencé assez tôt dans l'année; ils ont duré longtemps; ils se sont produits dans tout le bassin du Rhin.

schon Untersuchungen haben dies auch klar bestätigt. In Tabelle 4.3 wurden wahrscheinliche Abflüsse definierter Jährlichkeit von Fünf-Tagesperioden eingetragen. Zur Vereinheitlichung wurde nur die Weibull-Verteilung benutzt.

In den statistischen Betrachtungen tritt die Trockenperiode in den einzelnen Teilgebieten mit unterschiedlicher Jährlichkeit auf. Im Hochrhein und Aaregebiet läßt sie sich als 10–25-jährliches Ereignis einstufen, ebenso im Oberrhein am Pegel Basel. Rheinabwärts, so an den Pegeln Kaub und Lobith, verringert sich die Jährlichkeit auf wenige bis 10 Jahre. In den Mittelgebirgen dagegen stellt es sich als selteneres Geschehen dar. Hier tritt jedoch bei der Beurteilung der kurzen Reihe die Schwierigkeit auf, daß durch die Baumaßnahmen in Neckar, Main und Mosel die Niedrigwasserabflüsse stark beeinflusst werden. Dies hat die durchgeführte Trendanalyse, besonders in Main und Mosel (s. Abb. 4.3), deutlich gezeigt.

Die Niedrigwasserperiode des Jahres 1976 stellt sich bei der statistischen Untersuchung der kleinsten Mehrtagesmittel als nicht seltenes Ereignis dar (Tab. 4.3). Charakteristisch für diese Periode ist jedoch das rasche Absinken der Abflüsse schon im März und April und die lange Dauer. Zur Beurteilung dieser Erscheinung wurden für die Periode März bis August die zu bestimmten Wiederkehrzeiten gehörenden wahrscheinlichen mittleren Abflüsse an den einzelnen Pegeln ermittelt und den mittleren Abflüssen für das Jahr 1976 gegenübergestellt (Tab. 4.4). Die für die Trockenheit empfindliche Periode März bis August wird in den Kapiteln 2 und 3 näher betrachtet. Es zeigt sich, daß die untersuchte Periode in 1976 in dieser Hinsicht ein sehr seltenes Ereignis war. Am Pegel Lobith kann für die in Betracht genommenen Abflüsse eine mittlere Wiederkehrzeit von ca. 150 Jahren angegeben werden. Aus der Tabelle 4.4 ergibt sich weiter, daß die mittlere Wiederkehrzeit des Abflusses am Pegel Lobith von 150 Jahren in der Periode März bis August von einem Zusammentreffen von Abflüssen der Nebenflüsse des Rheins verursacht wird, die mit Ausnahme des Neckars alle eine kürzere Wiederkehrzeit (25 bis 50 Jahre) haben. Die relativ seltenen Ereignisse in den verschiedenen Teileinzugsgebieten haben zusammen also zu einem sehr seltenen Ereignis für das ganze Einzugsgebiet geführt. Somit liegt die Bedeutung der Niedrigwasserperiode des Jahres 1976 nicht in den niedrigen Abflüssen, sondern in einem Zusammentreffen verschiedener Faktoren: die niedrigen Abflüsse fingen schon früh im Jahre an; sie haben lange gedauert; sie traten im ganzen Rheineinzugsgebiet auf.

Nr.	Station Pegel	Fleuve Gewässer	A _{E0} km ²	Série Reihe	Récurrence moyenne (années)						1976
					Jährlichkeit (Jahre)						m ³ /s
					2	5	10	25	50	100	
1	Schmitter	Rhein	6 119	1955...1978	313	257	226	192	170	151	187
2	Brugg	Aare	11 750	1951...1979	356	291	259	228	210	196	198
3	Basel	Rhein	35 925	1951...1978	1252	1047	941	833	769	715	780
4	Plochingen	Neckar	4 002	1951...1979	44	35	32	30	29	29	24
5	Schweinfurt	Main	12 715	1951...1978	88	62	51	43	39	36	40
6	Grolsheim	Nahe	4 011	1951...1973	21	14	11	9	7	7	8
7	Kaub	Rhein	103 729	1951...1979	1777	1433	1277	1135	1059	1002	1022
8	Kalkofen	Lahn	5 320	1936...1979	36	24	19	14	11	8	14
9	Toul	Moselle	3 350	1960...1979	48	31	24	17	14	12	15
10	Mettlach	Saar	7 139	1953...1979	54	36	29	23	21	19	24
11	Cochem	Mosel	27 100	1951...1979	228	158	130	107	97	90	78
12	Lobith	Rhein	160 800	1951...1978	2188	1730	1536	1370	1286	1226	1165

Tab. 4.4 Débits moyens probables de la période mars à août (m³/s) de récurrence moyenne définie (d'après la distribution de Weibull)

Tab. 4.4 Wahrscheinliche mittlere Abflüsse für die Periode März bis August (m³/s) bestimmter Jährlichkeit (nach Weibull-Verteilung)

5. BILAN HYDRIQUE DU BASSIN DU RHIN EN AMONT DE LOBITH POUR LA PÉRIODE D'OCTOBRE 1975 À JANVIER 1977

5.1 Établissement du bilan hydrique

Un bilan hydrique est en général composé des éléments suivants:

- précipitations;
- écoulement, divisé en écoulement direct et en écoulement de base;
- évapotranspiration;
- emmagasinement qui se présente comme stockage sous forme de neige, d'eaux de surface, d'eaux souterraines et d'humidité du sol dans la zone non-saturée.

L'écoulement direct est constitué de l'écoulement de l'eau superficielle et de l'écoulement hypodermique, c'est-à-dire l'écoulement souterraine au-dessus de la nappe phréatique.

Par écoulement de base on entend la part de l'écoulement restituée avec un grand retard du fait d'un stockage de longue durée. Cet écoulement de base peut être considéré comme dépendant linéairement de la quantité totale d'eau emmagasinée [VAN DER MADE, 1982]:

$$Q_b = \frac{V_b}{T}$$

Q_b : écoulement de base en m^3 /jour
 V_b : quantité totale d'eau emmagasinée en m^3
 T : durée de tarissement en jours

Pour le mode de détermination de l'écoulement de base, se référer à la bibliographie [VAN DER MADE, 1982].

Pour le Rhin à Lobith, la durée de tarissement est de 150 jours [WEMELSFELDER, 1963].

Le bilan hydrique pour la période de sécheresse d'octobre 1975 à janvier 1977 (par. 3.1) qui est exposé dans les paragraphes suivants, a été établi conformément à la Monographie du bassin du Rhin [CHR/KHR, 1978, par. A.6.2]. On a considéré comme négligeable pour tout le bassin du Rhin en amont de Lobith l'emmagasinement sous forme d'eaux de surface, par rapport aux autres grandeurs du bilan hydrique.

On a comparé les précipitations et l'écoulement aux moyennes de longue durée calculées à partir de la période de référence 1931 à 1960. C'est seulement à partir du 1er janvier 1981 qu'on a pris une nouvelle période de référence pour les données météorologiques, à savoir celle de 1951 à 1980.

5. WASSERBILANZ DES EINZUGSGEBIETES DES RHEINS OBERHALB VON LOBITH FÜR DIE PERIODE OKTOBER 1975 BIS JANUAR 1977

5.1 Aufstellung der Wasserbilanz

Eine Wasserbilanz besteht im allgemeinen aus folgenden Elementen:

- Niederschlag;
- Abfluß (direkter Abfluß und Basisabfluß);
- Verdunstung;
- Speicherung (Schnee, oberirdisches Wasser, Grundwasser und Bodenfeuchte in der ungesättigten Zone).

Der direkte Abfluß setzt sich aus dem oberirdischen und dem Zwischenabfluß zusammen. Der Zwischenabfluß ist der Teil des Abflusses, der dem Gewässer unterirdisch oberhalb der gesättigten Zone mit nur geringer Verzögerung zufließt.

Unter Basisabfluß versteht man den Abfluß, der unter großer Verzögerung durch langfristige Speicherung zum Abfluß gelangt. Dieser Basisabfluß darf linear abhängig von der Gesamtmenge des gespeicherten Wassers angesetzt werden [VAN DER MADE, 1982]:

$$Q_b = \frac{V_b}{T}$$

Q_b : Basisabfluß in m^3 /Tag
 V_b : Gesamtmenge des gespeicherten Wassers in m^3
 T : Abminderungsdauer in Tagen

Zur Bestimmung des Basisabflusses sei auf die Literatur verwiesen [VAN DER MADE, 1982].

Für den Rhein bei Lobith beträgt die Abminderungsdauer 150 Tage [WEMELSFELDER, 1963].

Der Monographie des Rheingebietes [CHR/KHR, 1978, Abschn. A.6.2] folgend wird nachstehend für die Trockenperiode Oktober 1975 bis Januar 1977 (Abschn. 3.1) die Wasserbilanz aufgestellt. Hierin darf für das gesamte Einzugsgebiet des Rheins oberhalb von Lobith die Speicherung in Form von oberirdischem Wasser im Vergleich zu jeder anderen Größe der Wasserbilanz als vernachlässigbar angesehen werden.

Niederschlag und Abfluß werden mit den langjährigen Mittelwerten verglichen. Hierfür wurde der Zeitraum 1931 bis 1960 als Bezugsperiode zugrundegelegt. Erst seit dem 1. Januar 1981 gilt für meteorologische Daten die neue Bezugsperiode 1951 bis 1980.

5.2 Précipitations

On a déterminé les précipitations régionales sur le bassin du Rhin au moyen de la méthode des polygones de THIESSEN, à partir des données des précipitations de 20 stations de mesure (voir annexe 4).

Ces vingt stations sont celles qui ont été utilisées pour la description des périodes de sécheresse de 1959 et 1964 dans la Monographie [CHR/KHR, 1978, par. A.6.2]. On a veillé à ce que les valeurs des précipitations obtenues avec la méthode des polygones soient suffisamment représentatives de l'ensemble du bassin du Rhin jusqu'à Lobith, bien que cette méthode soit difficilement applicable à la haute montagne alpine.

La figure 5.1 présente les précipitations de la période d'octobre 1975 à janvier 1977, ainsi que les précipitations moyennes mensuelles de longue durée.

La figure 5.1 illustre clairement l'aspect de sécheresse de la période de février à août 1976, qui n'a été interrompue que par les précipitations de juillet 1976. Le mois de juin a été le mois le plus sec: les précipitations moyennes ont été égales à environ 31% de la moyenne de longue durée. L'annexe 5 contient les précipitations cumulées pour la période d'octobre 1975 à janvier 1977.

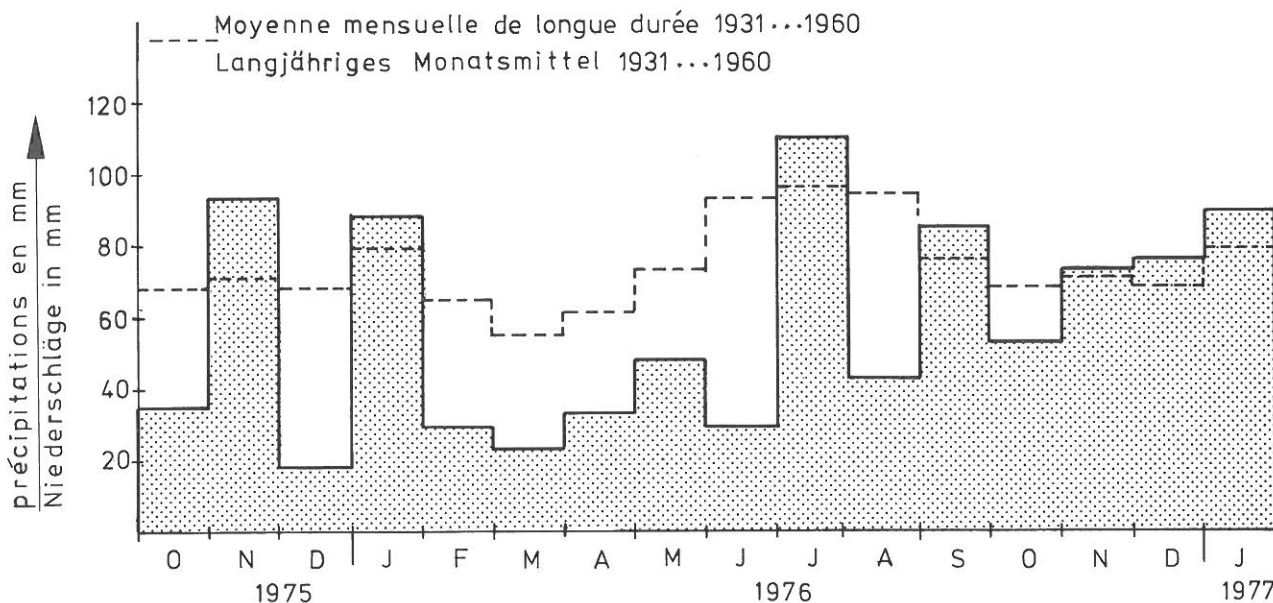


Fig. 5.1 Hauteurs moyennes mensuelles des précipitations dans le bassin du Rhin pendant la période d'octobre 1975...janvier 1977 et moyennes mensuelles des précipitations de la période 1931...1960.

5.2 Niederschlag

Der Gebietsniederschlag für das Einzugsgebiet des Rheins wurde mit Hilfe der Polygonmethode nach THIESSEN aus den Niederschlagsangaben von 20 Stationen bestimmt (s. Anlage 4).

Bei diesen zwanzig Stationen handelt es sich um dieselben, die zur Beschreibung der Trockenperiode 1959 und 1964 in der Monographie [CHR/KHR, 1978, Abschn. A.6.2] herangezogen wurden. Die nach der Polygonmethode gewonnenen Gebietsniederschläge werden als hinreichend repräsentativ für das gesamte Einzugsgebiet des Rheins bis Lobith angesehen, obgleich diese Methode nicht ohne weiteres auf das Hochgebirge der Alpen anwendbar ist.

In Abbildung 5.1 ist der Niederschlag für die Periode Oktober 1975 bis Januar 1977 wiedergegeben. In diese Abbildung sind ferner die langjährigen Monatsmittel der Niederschläge aufgetragen.

Aus Abbildung 5.1 geht deutlich der trockene Charakter des Zeitraums Februar bis August 1976 hervor. Die Trockenperiode wurde nur durch den Niederschlag im Juli 1976 unterbrochen. Vor allem der Monat Juni war extrem trocken: der mittlere Niederschlag betrug in diesem Monat etwa 31% des langjährigen Mittels. In Anlage 5 ist die Summenkurve des Niederschlags im Zeitraum Oktober 1975 bis Januar 1977 wiedergegeben.

Abb. 5.1 Mittlere monatliche Gebietsniederschlagshöhen im Rheingebiet für die Periode Oktober 1975...Januar 1977 und langjährige mittlere monatliche Niederschlagshöhen für die Periode 1931...1960.

Le tableau 5.1 contient les totaux des précipitations, exprimées en mm, pour la période d'octobre 1975 à janvier 1977, l'année hydrologique de novembre 1975 à octobre 1976 et la saison d'été très sèche de mars 1976 à août 1976. Ce tableau contient également les rapports entre ces précipitations et leurs moyennes de longue durée, exprimés en %.

In Tabelle 5.1 sind die Gebietsniederschläge in mm für die Zeiträume Oktober 1975 bis Januar 1977, das Abflußjahr November 1975 bis Oktober 1976 und das sehr trockene Sommerhalbjahr März 1976 bis August 1976 sowie die Verhältnisse (in %) zu ihrem langjährigen Mittelwert aufgeführt.

Periode	Précipitations Niederschlag		Écoulement Abfluß		Évapotranspiration Verdunstung	Emmagasinement Speicherung
	en mm	en % par rapport à la moyenne de longue durée 1931...1960	en mm	en % par rapport à la moyenne de longue durée 1931...1960	en mm	en mm
	in mm	in % des lang- jährigens Mittels 1931...1960	in mm	in % des lang- jährigens Mittels 1931...1960	in mm	in mm
oct. '75...janv. '76 Okt. '75...Jan. '76	928	78	362	65	472	+ 94
nov. '75...oct. '76 Nov. '75...Okt. '76	655	73	265	63	430	- 40
mars '76...août '76 März '76...Aug. '76	287	56	115	54	340	- 168

Tab. 5.1 Somme des précipitations, écoulements, évapotranspiration et emmagasinement pour trois périodes sur le bassin du Rhin en amont de Lobith

Tab. 5.1 Gesamtniederschlag, Abfluß, Verdunstung und Speicherung in drei Zeiträumen für das Einzugsgebiet des Rheins bis Lobith

5.3 Écoulement

La figure 5.2 montre l'évolution de l'écoulement du Rhin à Lobith pendant la période d'octobre 1975 à janvier 1977, ainsi que l'écoulement de base. Il en ressort qu'au début du mois de juillet et à la fin du mois d'août 1976 l'écoulement total était égal à l'écoulement de base.

5.3 Abfluß

Abbildung 5.2 zeigt die Abflußganglinie des Rheins bei Lobith für den Zeitraum Oktober 1975 bis Januar 1977 sowie die zugehörige Basisabflußganglinie. Wie man sieht, war Anfang Juli und Ende August 1976 der Gesamtabfluß gleich dem Basisabfluß.

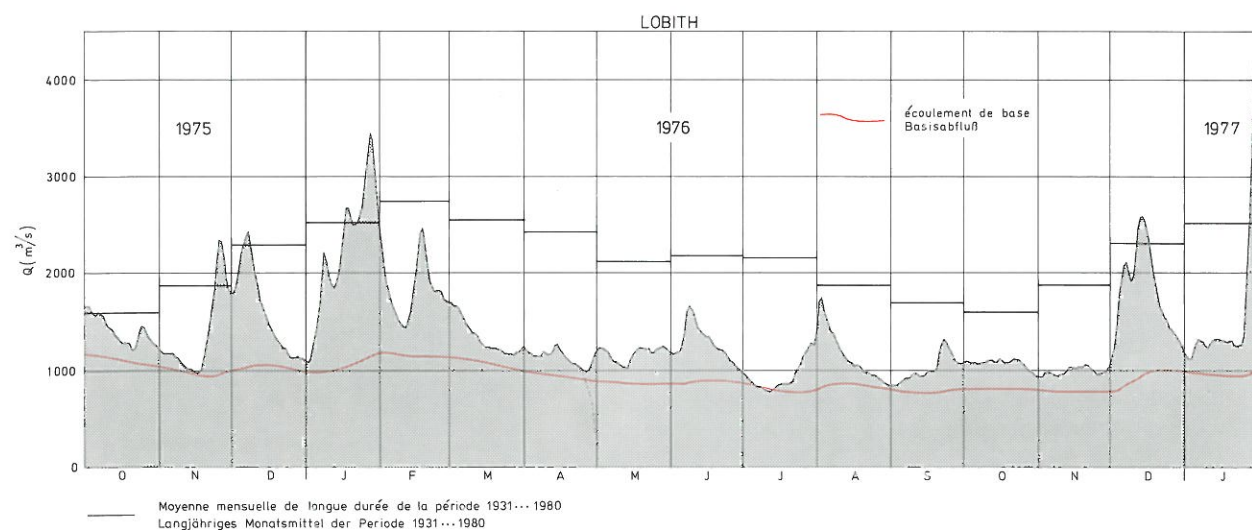


Fig. 5.2 Hydrogramme et hydrogramme de base à Lobith pour la période d'octobre 1975...janvier 1977.

Abb. 5.2 Abflußganglinie und Basisabflußganglinie Lobith für die Periode Oktober 1975...Januar 1977.

L'annexe 5 contient les courbes cumulées pour l'écoulement total et pour l'écoulement de base.

Le tableau 5.1 donne également la somme des écoulements du Rhin à Lobith, exprimés en mm de hauteur d'eau sur le bassin, pour les périodes citées au paragraphe précédent. Ce tableau contient également les rapports, exprimés en %, entre ces écoulements et leurs moyennes de longue durée.

5.4 Évapotranspiration

Pour la détermination de l'évapotranspiration, on a utilisé une autre méthode que celle décrite dans la Monographie [CHR/KHR, 1978, par. A.6.2].

On avait utilisé dans la Monographie une évaporation moyenne de 470 mm pour la période de 1931 à 1960. Or, étant donné les températures atmosphériques élevées et les nombreuses heures d'ensoleillement du printemps et de l'été 1976, l'évaporation potentielle était élevée, mais l'évaporation réelle a en fait été inférieure à la moyenne de longue durée en raison des faibles quantités d'eau disponibles. Il fallait donc s'écarter de la Monographie. Il y a des données d'évapotranspiration pour lysimètres à pesage qui sont tous situés à Gießen, Sindorf et Dortmund. Bien que ces données ne puissent fournir qu'une indication pour le bassin entier, on a pensé que celle-ci était cependant plus réelle que la moyenne de longue durée de 470 mm.

Le tableau 5.1 donne la somme de l'évapotranspiration pour les périodes déjà mentionnées. La moyenne de longue durée de ces stations n'est pas connue.

L'annexe 5 contient la courbe cumulée des précipitations obtenue après avoir soustrait l'évaporation des précipitations pour ces trois stations.

5.5 Emmagasinement

5.5.1 Généralités

L'emmagasinement est la différence entre les précipitations effectives et l'écoulement. Les précipitations effectives correspondent aux précipitations diminuées de l'évapotranspiration (cf. annexe 5).

On a tenté dans les paragraphes suivants de séparer les différentes formes d'emmagasinement en distinguant l'emmagasinement sous forme de neige, le volume stocké en eau souterraine et l'humidité du sol.

5.5.2 Emmagasinement sous forme de neige

Pour déterminer l'emmagasinement sous forme de neige, on a utilisé les données des 5 stations qui ont servi

Anlage 5 enthält die Summenkurven des Abflusses und des Basisabflusses.

Für die im vorigen Abschnitt genannten Perioden sind die Abflußhöhen des Rheins bei Lobith sowie ihre Verhältnisse (in %) zu den langjährigen Mittelwerten in Tabelle 5.1 angegeben.

5.4 Verdunstung

Zur Bestimmung der Verdunstung wurde eine andere Methode angewandt als in der Monographie [CHR/KHR, 1978, Abschn. A.6.2].

In der Monographie wurde dem Zeitraum 1931 bis 1960 eine mittlere Verdunstung von 470 mm zugrundegelegt. Wegen der hohen Lufttemperaturen und der vielen Sonnenscheinstunden im Frühjahr und Sommer 1976 war die potentielle Verdunstung sehr hoch. Dennoch dürfte die tatsächliche Verdunstung kleiner gewesen sein als das langjährige Mittel, weil nur wenig Wasser zur Verdunstung vorhanden war. Aus diesen Gründen wurde von der in der Monographie angewandten Methode abgewichen. Verdunstungsangaben stehen jetzt von wägbaren Lysimetern in Gießen, Sindorf und Dortmund zur Verfügung. Obwohl deren Daten nur einen Hinweis für das ganze Rheineinzugsgebiet geben können, erscheinen sie glaubwürdiger als das langjährige Mittel von 470 mm.

Tabelle 5.1 enthält die Verdunstungswerte für die obengenannten Zeiträume. Das langjährige Mittel dieser Stationen ist nicht bekannt.

In Anlage 5 ist die Summenkurve der Differenzen zwischen Gebietsniederschlag und mittlerer Verdunstung dieser drei Stationen dargestellt.

5.5 Speicherung

5.5.1 Allgemeines

Die Speicherung ist die Differenz zwischen effektivem Niederschlag und Abfluß. Der effektive Niederschlag ist Niederschlag minus Verdunstung (s. Anlage 5).

In den folgenden Abschnitten wird der Versuch gemacht, die Speicherung zu unterteilen in Schnee, Grundwasser und Bodenfeuchte.

5.5.2 Speicherung in Form von Schnee

Zur Bestimmung der Speicherung in Form von Schnee werden die 5 Stationen herangezogen, die be-

à la description des crues de février et mars 1970 [CHR/KHR, 1978, par. A.6.1].

Le tableau 5.2 donne les équivalents en eau de la couche de neige pour les hivers 1975/1976 et 1976/1977 pour les 5 stations concernées [SCHILD et GLIOTT, 1977 et 1978].

Date: Datum:	1975					1976					1977											
	1/11	15/11	1/12	15/12	1/1	15/1	1/2	15/2	1/3	15/3	1/4	15/4	1/5	15/5	1/6	1/11	15/11	1/12	15/12	1/1	15/1	1/2
Weißfluhjoch, 2540 m	48	82	196	198	215	317	392	421	427	433	442	451	486	404	329	-	119	196	347	352	423	470
Braunwald, 1320 m	-	-	110	102	105	185	294	352	348	350	294	162	-	-	-	-	-	-	182	164	236	252
Trübsee, 1800 m	-	91	188	218	221	281	399	441	471	483	527	566	611	-	-	-	94	104	261	270	294	404
Mürren, 1670 m	-	-	131	-	111	121	176	204	163	-	-	-	-	-	-	-	-	-	137	147	176	199
Leysin, 1250 m	-	-	-	-	-	-	94	146	150	161	-	-	-	-	-	-	-	-	60	27	150	59
Moyenne Mittelwert	-	-	-	-	-	-	271	313	312	-	-	-	-	-	-	-	-	-	197	192	256	277

Tab. 5.2 Équivalents en eau de la couche de neige des hivers 1975/1976 et 1976/1977 jusqu'au 1er février 1977 inclus (mm)

reits zur Beschreibung des Hochwassers von Februar und März 1970 (CHR/KHR, 1978, Abschn. A.6.1) benutzt wurden.

In Tabelle 5.2 sind die Wasseräquivalente der Schneedecke für die 5 Stationen angegeben, und zwar für die Wintermonate 1975/1976 und 1976/1977 [SCHILD und GLIOTT, 1977 und 1978].

Tab. 5.2 Wasseräquivalente der Schneedecke während der Wintermonate 1975/1976 und 1976/1977 bis 1. Februar 1977 (mm)

Il ressort des données des stations de mesure des précipitations situées en Allemagne du Sud que la hauteur de la neige était faible dans les régions peu élevées pendant l'hiver 1975/1976. On suppose donc que l'emmagasinement sous forme de neige s'est limité aux régions situées à plus de 1000 m au-dessus du niveau de la mer. Ces régions couvrent environ 10000 km². Les stations du tableau 5.2, exception faite de Leysin, ont généralement enregistré des épaisseurs de neige supérieures ou égales à celles enregistrées par les stations environnantes. On suppose donc que pour obtenir l'épaisseur de neige moyenne sur ces 10000 km², il est raisonnable de multiplier par 2/3 l'épaisseur moyenne de neige des stations du tableau 5.2 [CHR/KHR, 1978, par. A.6.1].

Il s'avère que le stock neigeux a atteint son maximum le 15 février 1976. L'équivalent en eau s'élève à 313 mm, soit $313 \times 10000 \times \frac{2}{3} \times 10^3 = 2,1 \times 10^9 \text{ m}^3$.

La courbe cumulée des différences entre les précipitations effectives et le stock neigeux est représentée dans l'annexe 5.

5.5.3 Volume stocké en eau souterraine

Comme cela a déjà été dit, l'écoulement de base dépend linéairement de l'emmagasinement de longue durée qu'on suppose (étant donné qu'on a tenu compte de la neige séparément) correspondre au volume stocké en eau souterraine (cf. par. 5.1).

Aus Angaben von Niederschlagsstationen in Süddeutschland geht hervor, daß im Winter 1975/1976 die Schneedeckenhöhe in den tiefer gelegenen Gebieten gering war. Es wird daher angenommen, daß damals die Schneespeicherung auf diejenigen Gebiete, die höher als 1000 m über mittlerer Meereshöhe lagen, beschränkt blieb. Dieses Gebiet umfaßt etwa 10000 km². Für die Stationen nach Tabelle 5.2 werden – mit Ausnahme von Leysin – im allgemeinen größere oder gleiche Schneedeckenhöhen gemessen als für Stationen in der Umgebung. Es wird daher angenommen, daß die mittlere Schneedeckenhöhe für das Gesamtgebiet von 10000 km² ermittelt werden kann, indem man die mittlere Schneedeckenhöhe der 5 Stationen nach Tabelle 5.2 mit 2/3 multipliziert [CHR/KHR, 1978, Abschn. A.6.1].

Wie sich zeigt, war die maximale Schneespeicherung am 15. Februar 1976 erreicht. Das entsprechende Wasseräquivalent betrug 313 mm oder $313 \times 10000 \times \frac{2}{3} \times 10^3 = 2,1 \times 10^9 \text{ m}^3$.

In Anlage 5 ist die Summenkurve der Differenzen zwischen effektivem Gebietsniederschlag und Schneespeicherung dargestellt.

5.5.3 Grundwasserspeicherung

Wie bereits erwähnt ist der Basisabfluß linear abhängig von der Speicherung von langer Dauer, die für den vorliegenden Fall der Grundwasserspeicherung gleichgesetzt wurde (Abschn. 5.1). Dabei wurde berücksichtigt, daß Schnee gesondert in die Berechnungen einbezogen wird.

On doit donc calculer l'évolution du volume stocké en eau souterraine en multipliant l'écoulement de base par la durée de tarissement de 150 jours, puis en déduisant le volume stocké en eau souterraine au 1er octobre 1975 [$V_b = Q_b \times T$].

Cette évolution par rapport à la courbe des débits cumulés est reportée dans l'annexe 5.

L'annexe 1 montre la répartition de l'eau souterraine dans le bassin du Rhin. La surface totale qui abrite de l'eau souterraine dans les roches poreuses représente environ 19% de l'ensemble du bassin du Rhin en amont de Lobith. Celle qui abrite de l'eau souterraine dans les crevasses et terrains karstiques représente au total 50% de ce bassin. Ces régions ne contribuent cependant que partiellement au stockage d'eau souterraine. Si ces régions contribuent à l'alimentation en eau souterraine pour 50% ou 25% de leur surface, cela signifie que $19\% + 0,5 \times 50\% = 44\%$ ou $19\% + 0,25 \times 50\% = 32\%$ du bassin du Rhin en amont de Lobith possèdent des nappes souterraines. On peut déduire de l'annexe 5 que le déficit en eau souterraine a été de $5 \times 10^9 \text{ m}^3$ en juillet 1976 par rapport au 1er octobre 1975, quand le volume stocké en eau souterraine fut déjà faible. Si la porosité des aquifères renfermant des eaux souterraines est estimée à 33%, le déficit en eau souterraine correspond à la baisse moyenne des nappes de

$$\frac{5 \times 10^9 \times 10^2}{0,44 \times 160.800 \times 10^6 \times 0,33} = 21 \text{ cm}$$

si l'on suppose que 44% du bassin possèdent une nappe. Si l'on suppose que 32% du bassin possèdent une nappe, la baisse est alors de 29 cm.

5.5.4 Emmagasinement sous forme d'humidité du sol

La zone située entre la courbe des précipitations effectives diminuées du stock neigeux et la courbe du volume stocké en eau souterraine, indiquée dans l'annexe 5 par un quadrillage, devrait pouvoir représenter théoriquement l'emmagasinement sous forme d'humidité du sol dans la zone non-saturée. Cet élément constitue le facteur équilibreur du bilan hydrique.

Pour la mesure de l'humidité du sol, on ne dispose que des données de 20 stations, toutes situées dans la province de Hesse. Ces données ne sont utilisées qu'en tant qu'indicateur de l'évolution de l'humidité du sol. Dans le bassin du Rhin la hausse ou la baisse des valeurs mensuelles de ces 20 stations par rapport à la valeur de novembre 1975, est donnée en valeurs moyennes et placée au-dessus de la courbe des réserves souterraines de l'annexe 5, indiquée par une ligne rouge. En fait, l'évolution de l'humidité du sol devrait être donnée par

Der Verlauf der Grundwasserspeicherung läßt sich also dadurch berechnen, daß man den Basisabfluß mit der Abminderungsdauer von 150 Tagen multipliziert und die Größe der Grundwasserspeicherung am 1. Oktober 1975 davon subtrahiert [$V_b = Q_b \times T$].

In Anlage 5 ist dieser Verlauf über der Abflußsummenkurve aufgetragen.

Anlage 1 zeigt das Grundwasservorkommen im Rheingebiet. Die Gesamtfläche der Gebiete, in denen Grundwasser in porösem Gestein vorkommt, beträgt etwa 19% des Gesamteinzugsgebietes des Rheins oberhalb von Lobith. Die Gebiete, in denen Grundwasser in Klüften und Karstgestein vorkommt, machen insgesamt 50% dieses Einzugsgebietes aus, tragen jedoch nur teilweise zum Grundwasservorkommen bei. Wenn diese Gebiete über 50% bzw. 25% ihrer Oberfläche Grundwasser enthalten, hat folglich $19\% + 0,5 \times 50\% = 44\%$ bzw. $19\% + 0,25 \times 50\% = 32\%$ des Einzugsgebietes des Rheins oberhalb von Lobith einen Grundwasserspiegel. Aus Anlage 5 ist abzuleiten, daß der Grundwassermangel im Juli 1976 bezogen auf den 1. Oktober 1975, als die Grundwasserspeicherung schon gering war (Abschn. 3.1), etwa $5 \times 10^9 \text{ m}^3$ betrug. Für den grundwasserführenden Teil des Einzugsgebietes mit einem geschätzten mittleren Porengehalt von 33% entsprach der Grundwassermangel einem mittleren Sinken des Grundwasserstandes von

$$\frac{5 \times 10^9 \times 10^2}{0,44 \times 160.800 \times 10^6 \times 0,33} = 21 \text{ cm}$$

wenn 44% des Einzugsgebietes einen Grundwasserspiegel haben. Für den Fall, daß 32% des Einzugsgebietes einen Grundwasserspiegel haben, ergibt sich diese Absenkung zu 29 cm.

5.5.4 Speicherung in Form von Bodenfeuchte

Die Fläche zwischen der Summenkurve des effektiven Niederschlags abzüglich Schneespeicherung und der Summenkurve der Grundwasserspeicherung, in Anlage 5 durch einen Raster gekennzeichnet, ließe sich theoretisch durch die Speicherung in Form von Bodenfeuchte in der ungesättigten Zone erklären. Diese Größe ist der »Abschlußposten« der Wasserbilanz.

Für diese Untersuchungen standen lediglich die Angaben von 20 Bodenfeuchte-Meßstellen in Hessen zur Verfügung. Diese dienen nur als Hinweis für den Gang der Bodenfeuchte. Für das ganze Rheingebiet sind Zu- und Abnahme der Monatswerte dieser 20 Stationen, bezogen auf den Wert für November 1975, gemittelt und über der Kurve der Grundwasserspeicherung in Anlage 5 rot markiert aufgetragen. Eigentlich müßte die Bodenfeuchte auf den Wert von Oktober 1975 bezogen werden, doch steht dieser Wert nicht zur

rapport à la valeur d'octobre 1975, qui n'est pas disponible. Par conséquent, il se peut qu'un faible déplacement vertical de la ligne soit nécessaire. Il s'avère que de février 1976 à octobre 1976, la zone située entre la courbe du volume des précipitations effectives diminuées du stock neigeux, d'une part, et la courbe de volume stocké en eau souterraine, d'autre part, peut raisonnablement être représentée par l'évolution de l'humidité des sols, ce qui est moins évident pour les périodes d'octobre 1975 à janvier 1976 et de novembre 1976 à janvier 1977.

5.6 Autres considérations

Au cours de la période pour laquelle le bilan hydrique a été établi, on peut distinguer trois cas de figure:

Premier cas:

Le total des précipitations effectives oté du stock neigeux réel est inférieur à la somme des débits, mais s'accroît néanmoins.

Ce phénomène a été constaté pendant les mois d'octobre et décembre 1975 et de février 1976. Il y a eu alors une augmentation de l'humidité du sol, et donc une légère reconstitution des eaux souterraines. L'écoulement provenait cependant partiellement du stockage de l'eau souterraine. Le résultat a été une diminution des totaux emmagasinés sous forme d'eau souterraine et d'humidité du sol.

Deuxième cas:

La courbe cumulée des précipitations effectives diminue. Ceci a été constaté pour les mois de mars à juin et pour le mois d'août 1976.

Ce cas signifie qu'il y a eu perte de l'humidité des sols par évaporation. Par ailleurs, il est possible que le taux d'humidité des sols ait été alimenté par ascension d'eau capillaire en provenance des nappes. Le niveau de l'eau souterraine a donc baissé par suite de cette ascension capillaire et par l'alimentation de l'écoulement de base. Il en est résulté une diminution de la réserve souterraine et de l'humidité du sol. Le fait que ce cas ne se soit pas produit pour le mois de juillet 1976 peut s'expliquer de la manière suivante:

C'est dans la première moitié du mois de juillet 1976 que le Rhin a connu son plus faible écoulement à Lobith, à savoir 782 m³/s. Comme le montre la figure 5.2, cet écoulement correspondait exactement à l'écoulement de base. Les précipitations moyennes mensuelles, utilisées dans le tableau de l'annexe 5, donne une image quelque peu déformée, car la plupart des chutes de pluies ont eu lieu pendant la dernière décade de juillet. De ce fait, ce n'est qu'à partir de cette période que les courbes cumulées des précipitations brutes et des précipitations effectives augmentent.

Verfügung. Somit könnte eine geringe vertikale Verschiebung der Linie notwendig sein. Wie sich herausstellt, kann die Fläche zwischen der Kurve für den effektiven Niederschlag minus Schneespeicherung einerseits und der Kurve für die Grundwasserspeicherung andererseits hinreichend durch den Verlauf der Bodenfeuchte erklärt werden. Für die Perioden Oktober 1975 bis Januar 1976 und November 1976 bis Januar 1977 wird ein Teil der Fläche nicht durch den Verlauf der Bodenfeuchte erklärt.

5.6 Nachbetrachtung

In dem Zeitraum, für den die Wasserbilanz gilt, lassen sich drei Fälle unterscheiden:

Fall 1:

Der summierte effektive Niederschlag, vermindert um die tatsächliche Schneespeicherung, ist kleiner als der summierte Abfluß, nimmt aber zu.

Dieser Prozeß spielte sich in den Monaten Oktober und Dezember 1975 und Februar 1976 ab. In diesem Fall erfolgte noch eine Ergänzung der Bodenfeuchte und damit auch eine geringe Ergänzung des Grundwassers. Der Abfluß wurde jedoch teilweise aus der Grundwasserspeicherung gespeist. Dies ergab eine Abnahme der Speicherung in Form von Grundwasser und Bodenfeuchte.

Fall 2:

Die Summenkurve des effektiven Niederschlags nimmt ab; dies gilt für die Monate März bis Juni sowie für August 1976.

Dieser Fall bedeutet Verlust an Bodenfeuchte durch Verdunstung. Gleichzeitig war aber eine Ergänzung der Bodenfeuchte durch kapillares Aufsteigen des Grundwassers möglich. Durch dieses kapillare Aufsteigen und durch den Beitrag zum Basisabfluß kam es zu einem Absinken des Grundwasserspiegels. Insgesamt ergab sich ein Rückgang der Speicherung in Form von Grundwasser und Bodenfeuchte. Fall 2 gilt nicht für Juli 1976. Dies ist wie folgt zu erklären:

Der niedrigste Abfluß des Rheins bei Lobith (782 m³/s) trat in der ersten Julihälfte 1976 auf. Nach Abbildung 5.2 entsprach dieser Abfluß vollständig dem Basisabfluß. Durch Verwendung der mittleren Monatsniederschläge gibt Anlage 5 ein etwas verzerrtes Bild: der meiste Niederschlag trat während der letzten Dekade des Juli auf. Erst ab diesem Zeitpunkt lassen die Summenkurven für Niederschlag und für effektiven Niederschlag einen Anstieg erkennen.

Troisième cas:

Le total des précipitations effectives oté du stock neigeux réel est supérieur à la somme des écoulements.

Ce phénomène a été constaté pendant les mois de novembre 1975, janvier et juillet 1976 et depuis septembre 1976. Ceci signifie qu'il y a eu à la fois reconstitution du taux d'humidité des sols et donc de l'eau souterraine. Il ressort de l'annexe 5 que le volume stocké en eau souterraine n'a commencé à augmenter fortement qu'en décembre 1976. Ce n'est vraisemblablement qu'à partir de ce moment que le taux d'humidité du sol a atteint sa valeur maximum, à partir de laquelle tout apport supplémentaire d'eau alimente les nappes. Le taux d'humidité du sol des stations à Hesse a augmenté aussi à partir de décembre 1976. Manifestement, le taux d'humidité du sol n'avait pas atteint sa pleine capacité.

Le bilan hydrique de l'annexe 5 ne donne pas une représentation exacte des quantités d'eau présentes dans le bassin du Rhin en amont de Lobith pendant la sécheresse de 1976, car les imprécisions des différentes grandeurs du bilan hydrique sont trop importantes. Ainsi, l'évolution de l'évapotranspiration n'a en effet été déterminée qu'à partir des données de trois stations du bassin du Rhin inférieur.

Pour le calcul du volume stocké en eau souterraine, on est parti de l'hypothèse que cet emmagasinement dépend linéairement de l'écoulement de base. En fait, ce n'est pas seulement le volume stocké en eau souterraine, mais l'emmagasinement total de longue durée qui doit être considéré comme dépendant linéairement de l'écoulement de base. Ceci implique que le stock neigeux a été, en partie, pris en compte deux fois dans le bilan hydrique. Une partie de la fonte des neiges alimente directement l'écoulement. Une autre partie reconstitue l'humidité du sol si ce dernier n'est pas gelé et, indirectement, l'eau souterraine. Or, dans le calcul du bilan hydrique, cet aspect n'a pas été pris en compte. En fait, il est probable que l'ampleur de ce phénomène est négligeable par rapport aux autres éléments du bilan hydrique.

L'humidité des sols a été considérée comme le facteur équilibreur dans ce bilan hydrique. Comme on ne disposait que des données d'humidité du sol d'une partie du bassin, données qui ne sont pas en elles-mêmes représentatives de l'ensemble du bassin du Rhin en amont de Lobith, l'imprécision est très grande dans l'évolution proposée de l'humidité du sol.

Afin de pouvoir vérifier la précision avec laquelle les variations des niveaux des eaux souterraines ont été estimées, il serait important de pouvoir disposer de données des niveaux des nappes phréatiques dans tout le bassin du Rhin. Par ailleurs, il ne faut pas oublier que les

Fall 3:

Der summierte effektive Niederschlag, vermindert um die aktuelle Schneespeicherung, ist größer als der summierte Abfluß.

Dieser Fall trat in den Monaten November 1975, Januar und Juli 1976 und ab September 1976 ein. Dies bedeutet, daß sowohl eine Ergänzung der Bodenfeuchte als auch – daraus folgend – eine Ergänzung des Grundwassers stattfand. Aus Anlage 5 geht hervor, daß die Grundwasserspeicherung erst im Dezember 1976 stark zunahm. Wahrscheinlich erreichte erst dann die Bodenfeuchte die Feldkapazität, d.h. den maximalen Feuchtegehalt. Jede weitere Wasserergänzung kommt dem Grundwasser zugute. Die Bodenfeuchte der Stationen in Hessen nahm aber auch ab Dezember 1976 zu. Offensichtlich hatte die Bodenfeuchte die Feldkapazität noch nicht erreicht.

Die Wasserbilanz in Anlage 5 stellt keine exakte Wiedergabe der Wassermengen im Einzugsgebiet des Rheins oberhalb von Lobith während der Trockenperiode von 1976 dar, weil die Ungenauigkeiten der verschiedenen Größen der Wasserbilanz zu groß sind. So wurde der Verlauf der Verdunstung nur aus den Daten von drei Stationen im Niederrheingebiet ermittelt.

Bei der Berechnung der Grundwasserspeicherung wurde davon ausgegangen, daß diese linear vom Basisabfluß abhängt. Tatsächlich ist nicht die Grundwasserspeicherung allein, sondern die gesamte Speicherung von langer Dauer als linear abhängig vom Basisabfluß anzunehmen. Dies bedeutet, daß die Schneespeicherung teilweise doppelt in der Wasserbilanz mitgezählt wurde. Bei Schneeschmelze kommt ein Teil direkt zum Abfluß, ein anderer Teil ergänzt – bei nicht gefrorenem Boden – die Bodenfeuchte und indirekt auch das Grundwasser. In der Wasserbilanz ist dies nicht berücksichtigt worden. Im Vergleich zu anderen Größen dürfte diese vernachlässigbar sein.

Als »Abschlußposten« ist in dieser Wasserbilanz die Bodenfeuchte gewählt worden. Da Bodenfeuchtwerte nur von einem Teil des Einzugsgebietes zur Verfügung standen, die nicht als repräsentativ für das gesamte Einzugsgebiet des Rheins anzusehen sind, dürfte die Ungenauigkeit der Bilanzgröße Bodenfeuchte groß sein.

Von großer Bedeutung ist auch die Kenntnis der Grundwasserstandsmeßwerte im gesamten Einzugsgebiet des Rheins, um die Genauigkeit beim Abschätzen des Grundwasserganges überprüfen zu können. Man darf im übrigen nicht vergessen, daß die Lage der

niveaux des nappes phréatiques et leurs évolutions sont étroitement liés à la structure géologique du sous-sol.

Grundwasseroberfläche und ihr Trendverhalten eng mit dem geologischen Aufbau des Untergrundes zusammenhängen.

6. QUELQUES CONSÉQUENCES DE LA SÉCHERESSE ET ÉVOLUTION FUTURE

6.1 Quelques conséquences de la sécheresse de 1976

La sécheresse de 1976 a eu une influence considérable sur l'économie et l'environnement.

L'agriculture a été la principale victime du manque de précipitations et du faible niveau de la nappe phréatique; elle a été plus sévèrement atteinte sur les sols légers que sur les sols lourds.

Le renouvellement de l'eau souterraine qui a précédé la période de sécheresse en 1975, les opérations d'irrigation et d'arrosage artificielles du printemps 1976 et les pluies intenses de juillet 1976 ont permis cependant d'éviter la catastrophe.

Dans le but de rendre les mesures prises pour l'arrosage aussi efficaces que possible, les stations de recherches agronomiques compétentes ont édicté en Suisse des instructions concernant l'arrosage des cultures. Ces recommandations tenaient en outre compte des conditions régionales très différentes.

L'approvisionnement en eau potable fut différemment touché. En général, les zones urbaines ont pu assurer leurs besoins en eau, si bien qu'elles n'ont connu que peu de problèmes. Par contre la situation fut différente dans les campagnes où l'on a dû faire face à des problèmes d'approvisionnement régionaux. Dans bien des régions du bassin on a dû imposer des restrictions pour l'utilisation de l'eau, interdire même par endroits l'arrosage des jardins ou le lavage des voitures. Lorsque ces mesures n'étaient pas suffisantes, on a dû recourir à des camions-citernes, voire à des hélicoptères pour assurer l'approvisionnement en eau potable.

La navigation, quant à elle, n'a été gênée par les faibles niveaux que sur le Rhin, les affluents étant pour la plupart régularisés par des barrages. On a dû pendant longtemps limiter le tirant d'eau des bateaux, toutefois il n'y a jamais eu d'interdictions de navigation. Aux Pays-Bas, ces limitations sont heureusement intervenues à un moment où différentes branches industrielles, dont le bâtiment, étaient en vacances, si bien que le volume de la navigation était moins important.

La sécheresse a entraîné pour l'approvisionnement en énergie d'énormes difficultés qui ont été de deux sortes. D'une part la production d'énergie hydro-électrique fut réduite en raison des faibles débits. En août 1976, le degré de remplissage des lacs d'accumulation suisses destinés à la production électrique n'était que

6. EINIGE FOLGEN DER TROCKENPERIODE UND ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNG

6.1 Einige Folgen der Trockenperiode von 1976

Die Trockenheit des Jahres 1976 hatte großen Einfluß auf Wirtschaft und Umwelt.

Vor allem die Landwirtschaft war überall durch den geringen Niederschlag und den niedrigen Grundwasserstand betroffen, auf den leichteren Böden stärker als auf den schwereren Böden.

Die der Trockenperiode vorausgegangene Ergänzung des Grundwassers im Jahre 1975, die künstliche Bewässerung und Beregnung im Frühjahr 1976 und der starke Regenfall vom Juli 1976 konnten jedoch eine Katastrophe verhindern.

Mit dem Ziel, Bewässerungsmaßnahmen möglichst effizient durchzuführen, haben in der Schweiz die zuständigen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten kulturtechnische Hinweise zur künstlichen Bewässerung ausgearbeitet. Diese Empfehlungen berücksichtigen die regional stark unterschiedlichen Gegebenheiten.

Die Trinkwasserversorgung war unterschiedlich betroffen. In den Städten konnte im allgemeinen der Wasserbedarf sichergestellt werden, so daß hier kaum Probleme auftraten. In den ländlichen Gebieten lagen die Verhältnisse anders, wobei regional Versorgungsprobleme auftraten. In großen Teilen des Einzugsgebietes mußte der Wasserverbrauch eingeschränkt werden, teilweise war das Sprengen von Gärten und das Waschen von Autos untersagt. Soweit sich auch diese Maßnahmen als unzureichend erwiesen, wurde die Trinkwasserversorgung durch Zulieferung von Wasser mit Tankwagen und manchmal sogar mit Hubschraubern aufrechterhalten.

Die Schifffahrt war nur auf dem Rhein selbst durch die niedrigen Wasserstände behindert, die Nebenflüsse des Rheins sind überwiegend staugeregelt. Längere Zeit galten Beschränkungen hinsichtlich der Abladetiefe, Fahrverbote wurden jedoch nicht erlassen. In den Niederlanden fielen diese Beschränkungen glücklicherweise in einem Zeitraum, in dem verschiedene Industriezweige, wie z.B. Bauunternehmen, Betriebsferien hatten, so daß der Schifffahrtsbetrieb ohnehin eingeschränkt war.

Bei der Energieversorgung traten infolge der Trockenperiode große Schwierigkeiten auf. Zwei Probleme sind hervorzuheben: zum einen war die Wasserkraftnutzung aufgrund der geringen Wasserführung eingeschränkt. Der mittlere Füllungsgrad der zur Energieerzeugung genutzten schweizerischen Stauseen betrug im

de 67%. D'autre part, les centrales thermiques ont dû, en raison de la faible production des centrales hydro-électriques, produire d'avantage d'énergie. En France, la production a augmenté pendant la période de mai à septembre 1976 de 37% par rapport à la moyenne de la période 1973 à 1975. Or, les centrales thermiques ont besoin d'eau de refroidissement et celle-ci était moins abondante en raison de la sécheresse. En raison donc de l'utilisation accrue de l'eau de refroidissement, la température de l'eau de la Moselle est montée jusqu'à 30°C, celle du Main jusqu'à 28°C. La station de Rheinfelden a enregistré en juillet une température maximale de l'eau de 24,7°C. Pour Worms le maximum était de 26,7°C et pour Lobith de 25,2°C.

La température élevée de l'eau a aussi eu des conséquences sur la qualité de l'eau. L'ensoleillement intense provoqua une prolifération des algues, étant donné le degré d'eutrophisation déjà élevé des cours d'eau. Ceci a eu pour conséquence une raréfaction de l'oxygène pendant la nuit, d'où la mort des poissons dans quelques petites rivières et dans la Moselle. La mort des poissons a également été due à l'assèchement de certains petits cours d'eau, provoqué par le prélèvement de l'eau pour les besoins de l'irrigation.

Les faibles niveaux et la mauvaise qualité de l'eau, en combinaison avec les températures élevées de l'été de 1976, ont causé, surtout dans le delta néerlandais, une forte augmentation de botulisme chez les oiseaux. Plus de 60.000 de cadavres ont été comptés. Dans certaines régions des Pays-Bas le botulisme a aussi provoqué la mort de poissons.

Par ailleurs, la turbulence plus faible des eaux, due aux faibles débits, a entraîné une diminution de la capacité d'absorption d'oxygène. A Rheinfelden le taux d'oxygène minimum était de 8,1 mg/l (5 juillet 1976).

Dans le Main, on a essayé, en faisant jouer les vannes des barrages et par des restrictions pour le rejet des eaux de refroidissement et des eaux résiduelles industrielles de maintenir la quantité d'oxygène nécessaire. Mais cela n'a pas toujours réussi pour le cours inférieur du Main: le taux d'oxygène minimum à Kahl a été pendant les semaines à 0 mg/l, alors qu'à Wipfeld la moyenne journalière du taux d'oxygène a baissé jusqu'à environ 1 mg/l (22 juillet 1976). A Metz, le taux d'oxygène minimum était égal à 1 mg/l (fin juin 1976) et à Lobith à 4,2 mg/l (fin juillet) et 3 mg/l (fin septembre).

On a également limité les rejets de sel. Néanmoins, le taux de chlorure de la Moselle atteignit 500 mg/l en juillet 1976, causé par un rejet de sel encore trop élevé dans le bassin supérieur. A Lobith, le maximum était de 334 mg/l le 13 juillet 1976.

August 1976 nur 67%. Zweitens mußten die Wärmekraftwerke infolge der geringen Produktion der Wasserkraftwerke entsprechend mehr Energie erzeugen. In Frankreich erhöhte sich die Produktion in der Periode Mai bis September 1976 gegenüber dem Mittel des Zeitraums 1973 bis 1975 um 37%. Wärmekraftwerke benötigen Kühlwasser, das jedoch wegen der Trockenperiode nur in geringeren Mengen verfügbar war. Infolge der erhöhten Kühlwassernutzung stieg die Wassertemperatur in Mosel und Main auf 30° bzw. 28°C an. Die Meßstation Rheinfelden registrierte im Juli 1976 eine maximale Wassertemperatur von 24,7°C, bei Worms betrug das Maximum 26,7°C und bei Lobith 25,2°C.

Die hohen Wassertemperaturen hatten auch Auswirkungen auf die Wasserqualität. Die starke Sonneneinstrahlung bewirkte bei dem bestehenden hohen Trophiegrad der Gewässer verstärktes Algenwachstum. Dies hatte während der Nachtstunden einen Sauerstoffmangel und damit auch Fischsterben in einigen kleinen Flüssen und in der Mosel zur Folge. An einigen kleinen Flüssen trat Fischsterben durch Austrocknen auf, verursacht u.a. durch die Wasserentnahme für Bewässerungszwecke.

Die schlechte Qualität und der niedrige Stand des Oberflächenwassers, kombiniert mit den hohen Temperaturen des Sommers 1976, verursachte vor allem im niederländischen Delta eine starke Vermehrung von Botulismus unter den Vögeln. Über 60.000 Kadaver wurden gezählt. In mehreren Gebieten der Niederlande hatte der Botulismus auch Fischsterben zur Folge.

Wegen der geringen Abflüsse war auch die Turbulenz des Wassers verhältnismäßig gering, wodurch die Sauerstoffaufnahme geringer war als bei starken Abflüssen. In Rheinfelden war der niedrigste Sauerstoffgehalt mit 8,1 mg/l am 5. Juli 1976 zu verzeichnen.

Im Main versuchte man durch geeignete Einstellung der Wehre (Wehrbelüftung) und durch Beschränkungen hinsichtlich der Einleitung von Kühlwasser und von Industrieabwässern den Sauerstoffgehalt aufrechtzuerhalten. Für den unteren Lauf des Mains gelang dies nicht immer: der niedrigste Sauerstoffgehalt bei Kahl betrug wochenlang 0 mg/l, während bei Wipfeld das Tagesmittel des Sauerstoffgehaltes auf etwa 1 mg/l (22. Juli 1976) sank. In Metz betrug der niedrigste Sauerstoffgehalt 1 mg/l (Ende Juni 1976) und in Lobith 4,2 mg/l (Ende Juli) sowie 3 mg/l (Ende September).

Auch die Ableitung von Salz war Beschränkungen unterworfen. Dennoch stieg der Chloridgehalt der Mosel im Juli 1976 auf 500 mg/l an, verursacht durch noch zu hohe Salzeinleitungen im oberen Einzugsgebiet. In Lobith betrug der höchste Chloridgehalt 334 mg/l am 13. Juli 1976.

Aux Pays-Bas, des mesures spéciales concernant la répartition de l'eau ont été prises pendant l'été 1976 pour lutter le mieux possible contre la pénétration de sel depuis la Mer du Nord. Il a fallu éviter en effet que l'embouchure du Hollandsche IJssel (rivière d'eau douce à marées), ne se salinise, ce qui aurait fait courir un danger sérieux à l'approvisionnement en eau douce du centre-ouest des Pays-Bas. Pour cela, on a amené au cours des mois d'été de l'eau depuis le Waal et via le bief de Betuwe du canal Amsterdam-Rhin jusqu'au Lek. Le débit du Lek a donc augmenté, ce qui a limité la pénétration du sel. Cette méthode compliquée de répartition de l'eau a eu pour avantage de ne pas influencer l'écoulement de l'IJssel. Ce qui n'aurait pas été le cas si l'eau avait été amenée au Rhin inférieur par l'intermédiaire du barrage de Driel. Cette dernière solution devait être, par ailleurs, évitée du fait des problèmes liés à la navigation et surtout à l'alimentation de l'IJsselmeer. Ce lac alimente en effet une grande partie des Pays-Bas du Nord en eau. On a également amené de l'eau du Lek par l'intermédiaire du canal Amsterdam-Rhin situé plus au nord. Cette eau a également été utilisée pour soutenir le débit des canaux du centre-ouest des Pays-Bas, ainsi que pour permettre le nettoyage du canal de la Mer du Nord et le remplissage du Markermeer.

A la suite du prélèvement d'eau au Waal près de Tiel, la profondeur de la passe navigable a diminué en raison de la baisse du niveau de l'eau ainsi que, localement, par le rehaussement du lit, provoqué par une sédimentation accrue due à la diminution de la vitesse d'écoulement. Des considérations théoriques permettent d'admettre que, lors d'un prélèvement d'eau de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant 5 mois, la diminution moyenne de la profondeur de la passe navigable à Tiel a été de 25 cm environ [DIXHOORN, 1981].

Malgré l'augmentation de l'écoulement du Lek, on a dû à trois reprises arrêter le flux de la marée à Krimpen aan den IJssel pour éviter la remontée d'une langue de sel dans l'Hollandsche IJssel. Malgré tout, on n'a pas pu éviter une salinisation passagère dans la première moitié de juillet et à la fin d'août 1976. Cette salinisation a disparu après l'augmentation des débits du Rhin.

6.2 Évolution future

Une augmentation de la consommation d'eau est directement liée au développement de l'industrie, de la population, du niveau de vie ainsi que de l'agriculture. Les pertes croissantes en eau dues à l'exploitation de

In den Niederlanden wurden im Sommer 1976 besondere Maßnahmen bezüglich der Wasserverteilung getroffen, um dem Eindringen von Salz aus der Nordsee nach Möglichkeit entgegenzuwirken. In erster Linie galt es eine Versalzung des Mündungsgebietes der Hollandsche IJssel und damit eine Versalzung dieses Süßwasser-Gezeitenflusses selbst zu verhindern, weil andernfalls die Süßwasserversorgung des mittleren westlichen Teils der Niederlande in ernstem Maße unmittelbar bedroht gewesen wäre. Zu diesem Zweck wurde während der Sommermonate Wasser aus der Waal bei Tiel über das Betuwepand des Amsterdam-Rijnkanals zum Lek geleitet. Die Wasserführung des Lek nahm daraufhin stark zu, so daß das Eindringen von Salz in Grenzen gehalten werden konnte. Der Vorteil dieser komplizierten Wasserverteilungsmethode bestand darin, daß sie den Abfluß der IJssel nicht beeinflusste. Hätte man über die Staustufe bei Driel mehr Wasser zum Niederrhein geleitet, so wäre dies auf Kosten des IJsselabflusses gegangen. Letzteres zu verhindern war im Zusammenhang mit der Schifffahrt und vor allem für die Speisung des IJsselmeeres wichtig. Das IJsselmeer versorgt nämlich einen großen Teil des Nordens der Niederlande mit Wasser. Auch wurde Wasser aus dem Lek durch den Amsterdam-Rijnkanal weiter nach Norden umgeleitet. Dieses Wasser wurde auch zur Stützung des Wasserhaushalts des mittleren westlichen Teils der Niederlande und außerdem für die Durchspülung des Nordseekanals und zur Ergänzung des Markermeers benutzt.

Wegen des Wasserentzugs aus der Waal bei Tiel verringerte sich die Fahrwassertiefe infolge Absinkens des Wasserspiegels, sowie örtlich durch eine Sohlenaufrhöhung, bedingt durch erhöhte Sedimentation infolge der Abnahme der mittleren Strömungsgeschwindigkeit. Aufgrund theoretischer Überlegungen ergibt sich, daß bei einem Wasserentzug von $30 \text{ m}^3/\text{s}$ während 5 Monate die mittlere Verringerung der Fahrwassertiefe bei Tiel etwa 25 cm beträgt [DIXHOORN, 1981].

Trotz der Abflußvergrößerung des Lek wurde die Sturmflutsperrre von Krimpen aan den IJssel dreimal geschlossen, um ein Vordringen der 'Salzzunge' in der Hollandsche IJssel während einer kurzzeitigen Erhöhung des Meeresspiegels zu verhindern. Trotzdem trat zweimal eine kurzzeitige Versalzung der Hollandsche IJssel auf, und zwar in der ersten Julihälfte und Ende August 1976. Die Versalzung wurde mit der Zunahme des Rheinabflusses wieder beendet.

6.2 Zukünftige Entwicklung

Mit der Entwicklung der Industrie, der Bevölkerung, des Lebensstandards sowie der Landwirtschaft ist allgemein ein Anstieg des Wasserverbrauchs verbunden. Die zunehmenden Wasserverluste bei der Ener-

l'énergie hydraulique, aux conduites d'eau potable et à l'évaporation, par exemple lors de l'arrosage de terrains agricoles, modifient de plus en plus le bilan hydrique du Rhin. On peut constater que l'agriculture et l'exploitation de l'énergie hydraulique sont les facteurs qui auront la plus grande influence sur le bilan. Des analyses ont montré que les pertes en eau de refroidissement dues à la production d'énergie par des centrales thermiques vont entraîner de nouvelles diminutions des débits. On a en effet constaté une diminution considérable des débits d'été du Neckar. Par l'effet équilibrant des réservoirs des Alpes l'influence sur le régime des basses eaux a été relativement faible jusqu'à présent. L'évolution croissante et l'augmentation de la production d'énergie l'emporteront sur cet effet compensatoire. C'est la raison pour laquelle on doit s'attendre à ce que les conditions d'été aillent en s'aggravant.

gierzeugung, durch Trinkwasserüberleitungen und durch Verdunstung – beispielsweise bei der Beregnung landwirtschaftlicher Flächen – verändern die Wasserbilanz des Rheins zusehends. Ganz allgemein läßt sich feststellen, daß Landwirtschaft und Energieerzeugung diejenigen Faktoren sind, die den stärksten Einfluß auf die Bilanz haben werden. Untersuchungen haben gezeigt, daß durch die Kühlwasserverluste bei der Erzeugung elektrischer Energie in Wärmekraftwerken weitere Abflußminderungen zu erwarten sind. So wird z.B. eine erhebliche Abflußminderung bei Niedrigwasser im Neckar nachgewiesen. Daß der Einfluß auf die Niedrigwasserführung bisher gering war, lag an dem ausgleichenden Einfluß der Speicher in den Alpen. Die weitergehende Entwicklung und der Ausbau der Energieerzeugung werden jedoch in Zukunft diesen Ausgleich übertreffen. Es ist deshalb abzusehen, daß sich die Niedrigwasserverhältnisse verschärfen werden.

7. RÉSUMÉ ET RECOMMANDATIONS

Le présent rapport donne une description de divers aspects de la sécheresse de 1976 et de son influence sur le bassin du Rhin. Les phénomènes de cette période de sécheresse sont expliqués du point de vue météorologique et hydrologique.

L'étude commence par des considérations météorologiques (chap. 2) qui mettent en parallèle les faibles précipitations survenues entre mars et août 1976 et les »anomalies« constatées dans la répartition de la pression atmosphérique au niveau de 500 mbar sur l'hémisphère nord. Ces phénomènes se sont révélés être liés à des anomalies des valeurs moyennes des températures de l'eau des océans Atlantique et Pacifique, constatées à la même époque. Comme ces températures et, par conséquent, les anomalies de la pression atmosphérique ne peuvent être prévues actuellement, des périodes de sécheresse comme celle de 1976 ne peuvent pas être prévues non plus. Les données de précipitations de la République fédérale d'Allemagne et des Pays-Bas mènent à la conclusion, que l'on peut dire avec une certitude de 95% qu'une période de sécheresse comme celle de la période de mars à août 1976 se produit entre une fois tous les 150 ans et une fois tous les 2000 ans, pourvu qu'il n'y ait pas de changements climatiques.

Le chapitre 3 donne une description hydrologique de la sécheresse de 1976. A partir de données de cinq stations hydrométriques rhénanes et de cinq stations piézométriques il est expliqué que l'extrême sécheresse avait été précédé, pour ce qui est du Rhin, d'une période sèche commencée en 1971 et interrompue seulement par quelques mois humides en 1975. Les précipitations de ces mois humides n'ont pas pu remettre le volume en eau souterraine fortement diminué au même niveau qu'avant 1971. Une analyse profonde de la période de sécheresse de 1976 montre, qu'en effet, celle-ci commença déjà en octobre 1975 et qu'elle a duré jusqu'en février 1977. En outre du niveau de l'eau souterraine fortement diminué, les facteurs suivants y ont joué un rôle:

- les faibles précipitations;
- les faibles quantités de l'eau de fonte au printemps 1976;
- la grande évaporation potentielle, causé par les températures élevées de l'air et par le grand nombre d'heures d'ensoleillement;
- les besoins croissants en eau.

La région alpine a joué un rôle très important pour les débits du Rhin: en juillet 1976 les débits à Rheinfelden constituaient 93% des débits à Lobith.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

Der vorliegende Bericht beschreibt verschiedene Aspekte der Trockenperiode 1976 und ihre Auswirkungen im Rheineinzugsgebiet. Die Phänomene dieser Trockenperiode werden aus meteorologischer und aus hydrologischer Sicht erklärt.

Die Studie beginnt mit einer meteorologischen Betrachtung (Kap. 2), worin der geringe Niederschlag in der Periode März bis August 1976 in eine Beziehung zu den seinerzeit aufgetretenen Abweichungen (sog. Anomalien) der Luftdruckverteilung in der 500-mb-Höhenschicht über der Nordhalbkugel gesetzt wird. Wie sich herausstellte, hing diese Luftdrucklage ihrerseits wieder mit den zur gleichen Zeit bestehenden Abweichungen von den mittleren Werten der Wassertemperaturen im Atlantik und Pazifik zusammen. Weil diese Temperaturen, und somit auch die Anomalien der Luftdruckverteilung, momentan noch nicht vorhergesagt werden können, können auch Trockenperioden so wie die von 1976 noch nicht vorhergesagt werden. Aufgrund von Niederschlagsdaten aus der Bundesrepublik Deutschland und aus den Niederlanden wird geschlossen, daß eine Trockenheit so wie die der Periode März bis August 1976, bei einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% durchschnittlich zwischen einmal alle 150 und einmal alle 2000 Jahre vorkommt, vorausgesetzt es tritt keine Klimaänderung auf.

Kapitel 3 enthält eine hydrologische Beschreibung der Trockenperiode 1976. Anhand von Daten von fünf Rheinpegeln und von fünf Grundwassermeßstellen wird gezeigt, daß der Trockenperiode des Jahres 1976 – was den Rhein betrifft – eine Trockenperiode vorausging, die schon 1971 einsetzte und nur durch einige nasse Monate im Jahre 1975 unterbrochen war. Der Niederschlag dieser nassen Monate genügte jedoch nicht, um die inzwischen stark verringerten Grundwassermengen auf den Stand wie vor 1971 zurückzubringen. Eine weitere Analyse der Trockenperiode 1976 zeigt, daß sie schon Oktober 1975 einsetzte und eigentlich bis Februar 1977 dauerte. Außer dem verringerten Grundwasserstand spielten die nachstehenden Faktoren eine Rolle:

- die geringen Niederschlagsmengen;
- die geringen Schmelzwassermengen im Frühjahr 1976;
- die große potentielle Verdunstung, verursacht von den hohen Lufttemperaturen und der großen Anzahl Sonnenscheinstunden;
- der zunehmende Wasserbedarf.

Das Alpengebiet hat für den Abfluß des Rheins eine große Rolle gespielt: im Juli 1976 betrug der Abfluß bei Rheinfelden 93% des Abflusses bei Lobith.

Le chapitre 4 contient une analyse statistique des débits d'étiage du Rhin et de ses affluents. La probabilité d'occurrence des basses eaux fut étudiée pour douze stations importantes. Avant de déterminer les probabilités des débits, on a procédé à des vérifications d'homogénéité et à une analyse des tendances. Des lignes empiriques de fréquence au non-dépassement des débits moyens des différents mois montrent, que la fréquence d'occurrence de l'événement des basses eaux de 1976 est d'une fois tous les 3–10 ans pour la Rhin en amont de Bâle et d'une fois tous les 10–40 ans pour les affluents. Pour évaluer les conditions d'étiage à l'aide d'analyses théoriques de probabilité on a retenu la loi de distribution des valeurs extrêmes du type III (Weibull) qui, de cinq lois utilisées, donnait la meilleure adaptation. Cette loi de distribution montre que les débits moyens journaliers minimums de 5 jours jusqu'aux valeurs moyennes de 180 jours consécutifs ont une probabilité d'occurrence d'une fois tous les 10–25 ans pour le Rhin en amont de Bâle, et d'une fois tous les 10 ans pour le Rhin à Kaub et à Lobith. Au fur et à mesure que l'on considère des périodes plus longues, la période de sécheresse de 1976 devient un phénomène de plus en plus rare. De l'analyse des débits moyens mensuels de mars à août on peut conclure, que la période de récurrence moyenne des débits de 150 ans ou plus (cf. chap. 2) à la station de Lobith, est provoquée par une coïncidence de débits des affluents du Rhin, qui ont tous, à l'exception du Neckar, une période de récurrence plus courte (25 à 50 ans).

Le chapitre 5 est consacré au bilan hydrique du bassin du Rhin en amont de Lobith pour la période d'octobre 1975 à janvier 1977. Ce bilan a été établi sur la base d'une méthode correspondant à celle employée dans la Monographie pour les années sèches de 1959 et 1964. Quant à l'évaporation et l'emmagasinement de l'eau sous forme de neige et d'humidité du sol, on n'a disposé que de peu de données de mesure pour 1976. Dans l'annexe 5, la courbe des précipitations effectives cumulées diminuées du stock neigeux est comparée avec celle des débits plus le volume stocké en eau souterraine. La différence, le »facteur équilibrer«, devrait pouvoir représenter l'emmagasinement sous forme d'humidité du sol et les imprécisions des valeurs des divers éléments.

Le chapitre 6 décrit quelques conséquences de la période de sécheresse pour l'agriculture, l'approvisionnement en eau potable, la navigation, l'approvisionnement en énergie, la qualité de l'eau et la répartition de l'eau. On doit s'attendre à ce que le besoin croissant en eau, causé e.a. par la production d'énergie, aggravera les conditions d'étiage.

In Kapitel 4 werden die Niedrigwasserabflüsse des Rheins einer statistischen Analyse unterzogen. An zwölf wichtigen Pegeln wurde die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Niedrigwasser untersucht. Die Daten wurden zunächst auf Homogenität geprüft und einer Trendanalyse unterzogen, bevor die Abflußwahrscheinlichkeiten ermittelt werden konnten. Empirische Unterschreitungslinien der mittleren Abflüsse in den einzelnen Monaten zeigen, daß die Eintretenswahrscheinlichkeit des Niedrigwasserereignisses 1976 im Rhein oberhalb von Basel einmal alle 3–10 Jahre beträgt; in den Nebenflüssen beträgt sie einmal alle 10–40 Jahre. Bei den wahrscheinlichkeitstheoretischen Untersuchungen diente die Extremalverteilung Typ III (Weibull) der Beurteilung der Niedrigwasserverhältnisse, da sie die beste Anpassung von fünf verschiedenen Verteilungsfunktionen ergab. Aus dieser Verteilung ergibt sich, daß die kleinsten mittleren Tagesabflüsse von 5 Tagen bis den kleinsten mittleren Werten von zusammenhängenden 180 Tagen oberhalb von Basel eine Eintretenswahrscheinlichkeit von einmal alle 10–25 Jahre, und bei Kaub und Lobith von einmal alle 10 Jahre haben. Die Trockenperiode des Jahres 1976 wird mit zunehmender Dauer zu einem seltener werdenden Ereignis. Aus der Analyse der mittleren Abflüsse der Monate März bis August wird geschlossen, daß die mittlere Wiederkehrzeit des Abflusses am Pegel Lobith von 150 Jahren oder länger (siehe Kap. 2) von einem Zusammentreffen von Abflüssen der Nebenflüsse des Rheins verursacht wird, die mit Ausnahme des Neckars alle eine kürzere Wiederkehrzeit (25 bis 50 Jahre) haben.

Kapitel 5 enthält die Wasserbilanz des Einzugsgebietes des Rheins oberhalb von Lobith für die Periode Oktober 1975 bis Januar 1977. Die Aufstellung dieser Wasserbilanz knüpft an die in der Monographie für die trockenen Jahre 1959 und 1964 angewandte Methode an. Für 1976 konnten bezüglich der Verdunstung und der Wasserspeicherung in Form von Schnee und Bodenfeuchte relativ wenig Meßdaten herangezogen werden. In Anlage 5 wird die Summenkurve des effektiven Niederschlags abzüglich Schneespeicherung mit derjenigen des Abflusses plus Grundwasserspeicherung verglichen. Die Differenz, der »Abschlußposten«, könnte sich durch die Speicherung in Form von Bodenfeuchte und durch Ungenauigkeiten in den Werten der verschiedenen Komponenten erklären lassen.

Kapitel 6 beschreibt einige Folgen der Trockenperiode für die Landwirtschaft, die Trinkwasserversorgung, die Schifffahrt, die Energieversorgung, die Wasserqualität und die Wasserverteilung. Durch zunehmenden Wasserbedarf, u.a. für Energieerzeugung, werden die Niedrigwasserverhältnisse sich in Zukunft wahrscheinlich noch verschärfen.

Recommandations

On doit s'attendre que les problèmes, décrits dans ce rapport et touchant l'ensemble du bassin du Rhin, se manifesteront de nouveau à l'avenir, si des conditions comparables se produisent. Pour cette raison, il est fortement recommandé de suivre minutieusement les développements météorologiques et hydrologiques à long terme. Dans le domaine de la météorologie il s'agit de la persistance des types de circulation et de l'évolution des températures de l'eau de mer, tandis que pour l'hydrologie, le bilan hydrique est très important. Celui-ci devrait être établi périodiquement et d'une façon routinière. A cet effet, une bonne fourniture de données est très importante.

Empfehlungen

Weil man die in diesem Bericht beschriebenen Probleme, die im ganzen Rheingebiet auftraten, in Zukunft bei ähnlichen Verhältnissen wieder erwarten kann, wird nachdrücklich empfohlen, die meteorologischen und hydrologischen Vorgänge auf längere Frist genau zu beobachten. Auf dem Gebiet der Meteorologie geht es dabei um die Persistenz von Zirkulationstypen und um den Verlauf der Meereswassertemperaturen, während für die Hydrologie die Wasserbilanz sehr wichtig ist. Diese sollte periodisch und routinemäßig aufgestellt werden, wobei eine gute Datenlieferung sehr wichtig ist.

7. SAMENVATTING EN AANBEVELINGEN

In dit rapport worden verschillende aspecten van de droogte van 1976 en de gevolgen ervan voor het stroomgebied van de Rijn beschreven en uit meteorologisch en hydrologisch oogpunt verklaard.

Deze studie begint met een meteorologische beschouwing (hoofdstuk 2), waarin voor de periode van maart tot en met augustus 1976 de geringe neerslag in verband wordt gebracht met de afwijkingen (zgn. anomalieën) in de luchtdrukverdeling op het niveau van 500 mbar boven het noordelijk halfrond. Verder is de samenhang onderzocht tussen deze luchtdrukverschijnselen en de gelijktijdig optredende afwijkingen van de gemiddelde waarden van de watertemperaturen in de Atlantische en de Grote Oceaan. Aangezien deze temperaturen en daardoor de anomalieën in de luchtdrukverdelingen momenteel nog niet te voorspellen zijn, zijn ook de droogteperiodes zoals die van 1976 nog niet voorspelbaar. Uit neerslaggegevens uit de Bondsrepubliek Duitsland en Nederland wordt geconcludeerd, dat de kans op een droogte zoals die van de maanden maart tot en met augustus 1976, met een betrouwbaarheid van 95% ligt tussen één keer per 150 jaar en één keer per 2000 jaar, mits het klimaat niet verandert.

Hoofdstuk 3 geeft een hydrologische beschrijving van de droogte van 1976. Uit gegevens van vijf Rijnstations en vijf grondwaterstations blijkt dat de droogte van 1976 – voor wat de Rijn betreft – voorafgegaan werd door een droge periode, die reeds in 1971 begon en alleen onderbroken werd door een aantal natte maanden in 1975. De neerslag in deze natte maanden was echter niet voldoende om het inmiddels sterk verlaagde grondwaterpeil op het niveau van vóór 1971 terug te brengen. Uit een nadere beschouwing van de droogteperiode 1976 blijkt, dat deze eigenlijk in oktober 1975 begon en in feite duurde tot februari 1977. Behalve de verlaging van het grondwaterpeil speelden de volgende factoren een rol:

- de geringe neerslaghoeveelheden;
- de geringe smeltwaterhoeveelheden in het voorjaar 1976;
- de grote potentiële verdamping, veroorzaakt door de hoge luchtdruktemperaturen en het grote aantal zonschijnuren;
- de toegenomen waterbehoefte.

Het Alpengebied bleek van zeer grote betekenis voor de afvoer van de Rijn te zijn: in juli 1976 droeg de afvoer bij Rheinfelden voor 93% bij aan de afvoer te Lobith.

In hoofdstuk 4 worden de lage afvoeren van de Rijn en zijn zijtakken aan een statistische analyse onderworpen. Voor twaalf belangrijke peilmeetstations is de kans op optreden van lage afvoeren onderzocht. Daartoe zijn de afvoergegevens van deze stations eerst

7. SUMMARY AND RECOMMENDATIONS

The present report gives a description of different aspects of the drought of 1976 and of its influence on the Rhine basin. The phenomena of this dry period are explained from a meteorological and a hydrological point of view.

The study begins with meteorological considerations (chap. 2). The interrelation between the low precipitations and the deviations (so-called anomalies) of the air pressure distributions at the 500 mb altitude over the northern hemisphere is examined for the period March to August 1976. Furthermore, the interdependency between these atmospheric conditions and the deviations of the average values of the water temperatures in the Atlantic and the Pacific in that period is investigated. Since these temperatures, and consequently the anomalies of the air pressure distribution cannot be forecasted at present, dry periods like the one of 1976 cannot be forecasted either. From German and Dutch precipitation data the conclusion has been drawn, that with a 95% confidence, the mean return period of a drought like the one of the period from March to August 1976 lies between 150 and 2000 years, provided that the climate does not change.

Chapter 3 gives a hydrological description of the drought of 1976. Data of five Rhine gauging stations and of five piezometric stations show that the extreme drought of 1976 was preceded by a dry period that already began in 1971 and that was – as far as the Rhine is concerned – only interrupted by some wet months in 1975. However, the precipitations of these wet months could not restore the meanwhile strongly reduced groundwater table up to the level of before 1971. A profound analysis of the drought of 1976 shows that, in fact, it already started in October 1975 and that it lasted until February 1977. Besides the strongly reduced groundwater level the following factors played a role:

- the small amounts of precipitation;
- the small amounts of melt water in the spring of 1976;
- the high potential evaporation caused by high air temperatures and by the great number of sunshine hours;
- the increasing water demands.

The Alpine region played an important role for the Rhine discharge: in July 1976 the discharge at Rheinfelden amounted to 93% of the discharge at Lobith.

Chapter 4 gives a statistical analysis of the low water discharges of the Rhine and its tributaries. The probability of occurrence of low water was examined for twelve important gauging stations. Before the discharge probabilities could be determined, homogeneity

getoetst op homogeniteit en onderworpen aan een trendanalyse. Uit empirische frequentielijnen van de gemiddelde afvoeren in de afzonderlijke maanden blijkt, dat het laagwater van 1976 in de Rijn bovenstrooms van Bazel een kans van optreden heeft, die ligt tussen 3 en 10 jaar. Voor de zijrivieren ligt deze kans tussen 10 en 40 jaar. Voor de beoordeling van de kans op lage afvoeren is gebruik gemaakt van de extreme-waarden-verdeling type III (Weibull), omdat deze van de vijf onderzochte verdelingsfuncties de beste aanpassing bleek te geven. Uit deze verdeling blijkt, dat de laagste gemiddelde afvoeren van 5 tot 180 aaneengesloten dagen een kans van optreden hebben, variërend van één keer per 10–25 jaar bovenstrooms van Bazel tot één keer per 10 jaar te Kaub en te Lobith. Bij toenemende lengte van de tijdvakken wordt de droogte van 1976 meer uitzonderlijk van aard. Uit een onderzoek van de gemiddelde afvoeren van de maanden maart tot en met augustus wordt geconcludeerd, dat de kans op optreden ongeveer één keer per 25–50 jaar is voor de afvoeren van de zijrivieren, uitgezonderd voor die van de Neckar. Deze kansen samen resulteren in een kans van één keer per 150 (of meer) jaren (zie hoofdstuk 2) voor de afvoer in deze periode te Lobith.

Hoofdstuk 5 gaat over de waterbalans van het stroomgebied van de Rijn bovenstrooms van Lobith voor de periode oktober 1975 tot en met januari 1977. De wijze van opstellen van deze waterbalans sluit aan bij de methode toegepast in de Monografie voor de droge jaren 1959 en 1964. Voor de grootte van de verdamping en de berging in de vorm van sneeuw en bodemvocht in 1976 waren slechts weinig metingen beschikbaar. In bijlage 5 wordt de sommatiekromme van de nuttige neerslag minus de berging in de vorm van sneeuw vergeleken met die van de afvoer plus de grondwaterberging. Het verschil, de sluitpost, zou verklaard kunnen worden door de berging in de vorm van bodemvocht en door onnauwkeurigheden in de waarden van de verschillende componenten.

Hoofdstuk 6 beschrijft enige gevolgen van de droogte voor de landbouw, de drinkwatervoorziening, de scheepvaart, de energievoorziening, de waterkwaliteit en de waterverdeling. Te verwachten valt dat in de toekomst door een toenemende waterbehoefte (o.a. voor energievoorziening) de omstandigheden tijdens droogteperioden nog zullen verergeren.

tests and trend analyses were carried out. Empirical graphs of the frequency distributions of mean discharges in different months show that the probability of occurrence of the low water phenomenon of 1976 amounts to once per 3–10 years in the Rhine basin upstream of Basel and to once per 10–40 years in its tributaries. For the evaluation of the low water conditions by means of theoretical probability analysis, the type III extreme value distribution (Weibull) has been adopted, as it fitted best of all five examined distributions. This distribution shows, that the lowest average discharge-values of 5 consecutive days up to the lowest average values of 180 consecutive days has a probability of occurrence of once per 10–25 years in the Rhine upstream of Basel and of once per 10 years at Kaub and at Lobith. When longer periods are considered the drought of 1976 becomes more and more extreme. From the analysis of the average discharges during the months from March to August the conclusion can be drawn that the mean return period of 150 years or longer (see chap. 2) at Lobith is caused by a coincidence of discharges of the river Rhine tributaries, with exception of the Neckar, all having a shorter return period (25 to 50 years).

Chapter 5 deals with the water balance of the Rhine basin upstream of Lobith for the period October 1975 to January 1977. This water balance has been drawn up corresponding to the method, used for the water balances of the dry years 1959 and 1964, as described in the Monograph. As far as the evaporation and the water storage in the form of snow and soil moisture are concerned, relatively few measure data were available for 1976. In annexe 5 the mass curve of the net precipitations minus snow storage is compared to the mass curve of discharges plus groundwater storage. The difference, the »closing entry«, could be explained by the storage in the form of soil moisture and by inaccuracies in the values of the different components.

Chapter 6 deals with some effects of the dry period on agriculture, drinking water supply, navigation, power production, water quality and water distribution. The low water conditions are expected to aggravate in future by an increasing water demand (e.g. for power production).

Aanbevelingen

Aangezien de in dit rapport beschreven problemen, die zich in het hele stroomgebied van de Rijn voordeden, in de toekomst onder soortgelijke omstandigheden weer verwacht kunnen worden, verdient het sterke aanbeveling de meteorologische en hydrologische omstandigheden op lange termijn nauwlettend te volgen. Op het gebied van de meteorologie gaat het om de bestendigheid van circulatiepatronen en het verloop van de watertemperaturen van de oceanen; bij de hydrologie om het verloop van de waterbalans. Deze zou periodiek en routinematig opgesteld moeten worden, waarvoor een goede gegevensvoorziening essentieel is.

Recommendations

The entire Rhine basin was struck by the problems, dealt with in this report. They are expected to arise again under similar circumstances. Therefore, it is strongly recommended to follow closely the long term meteorological and hydrological processes. In the field of meteorology, the persistence of circulation types and the variations of sea water temperatures are of special interest, whereas for the hydrology the water balance is very important. This balance should be drawn up periodically and on a routine basis. Therefore, a good supply of data is essential.

BIBLIOGRAPHIE

LITERATURVERZEICHNIS

Chapitre 2/Kapitel 2:

- CHR/KHR (1978): Le bassin du Rhin/Das Rheingebiet, Monographie Hydrologique/Hydrologische Monographie, Tome A/Teil A, Den Haag.
- HOSKINS, B. J.; KAROLY, D. J. (1981): The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. Submitted to J. Atm. Science.
- K.N.M.I. (1976): De droogte van 1976. Publicatie no. 154. De Bilt, 33 blz.
- NAMIAS, J. (1978): Recent drought in California and Western Europe. Rev. Geoph. Space Phys. 16, p. 435...458.
- OPSTEEGH, J. D.; DOOL, H. M. VAN DEN (1980): Seasonal differences in the stationary response of a linearized primitive equation model: prospects for long-range weather forecasting? J. Atm. Science 37, p. 2169...2185.
- RATCLIFFE, R. A. S. (1978): Meteorological aspects of the 1975...1976 drought. Proc. Ray. Sec. London A363, p. 3...20.
- REIFF, J. (1978): Zijn droge zomers voorspelbaar? Zenit 5, blz. 426...430.

Chapitres 3 et 6/Kapitel 3 und 6:

- AGENCE FINANCIÈRE DE BASSIN RHIN-MEUSE (1976): La sécheresse de 1976 dans le bassin Rhin-Meuse. Moulins-lès-Metz, 24 p.
- COURVOISIER, H.; MÄDER, F.; PRIMAULT, B.: La sécheresse de 1976 et ses conséquences/Die Dürre 1976 und ihre Auswirkungen. Rapports de travail de l'institut Suisse de Météorologie/Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, Zürich, 36 p.
- DELALEX, J.; MIGAYROU, J.; GENDRIN, P. (1977): Sécheresse de l'année 1976. Service régional de l'aménagement des eaux Alsace, 49 p.
- DIXHOORN, K. VAN (1981): Veranderingen in waterstand en bodemligging t.g.v. een wateronttrekking te Wijk bij Duurstede. Nota 81.31 Rijkswaterstaat. Directie Waterhuishouding en Waterbeweging, district Zuidoost, Arnhem, 27 blz.
- EIDG. AMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT: Trockenheit 1976, 20 S.
- HEIJDE, P. K. M. VAN DER (1978): De droogte van 1976. Commissie voor hydrologisch onderzoek TNO. Serie rapporten en nota's no. 3, Den Haag, 114 blz.
- JEANFILS, E. (1977): La sécheresse de l'année 1976 en Haute Belgique. Série 'Notes de Recherche' 12, Arlon, 88 p.
- MISSION INTERMINISTÉRIELLE DE L'EAU: La sécheresse en 1976, 38 p.
- RIJKSWATERSTAAT, DIRECTIE WATERHUISHOUDING EN WATERBEWEGING (1978): De waterhuishouding van Nederland in de droge perioden van 1976. Nota WH 77.11, Rijkswaterstaat, Den Haag, 100 blz.
- SCHILD, M.; GLIOTT, S. (1977): Schnee- und Lawinverhältnisse im Schweizerischen Alpengebiet. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung nr. 40, Weißfluhjoch/Davos S. 37...77.
- SCHRIFTENREIHE BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1979): Die Trockenperiode 1976, Heft 12, München, 253 S.

Chapitre 4/Kapitel 4:

CHR/KHR (1978): Le bassin du Rhin/Das Rheingebiet, Monographie Hydrologique/Hydrologische Monographie, Tome B/Teil B, Den Haag.

EGGERS, H. (1979): Der Einfluß seltener Ereignisse bei der Bestimmung der Hochwasserwahrscheinlichkeit. Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau und Kulturtechnik. Theodor-Rehbock-Flußbaulaboratorium. Universität Fridericiana Karlsruhe, Heft 167, S. 1...145.

GERHARD, H. (1979): Low Water Conditions and Trends as a Result of Human Interference in Drainage Area of Rhine River. Hydrological Aspects of Droughts, International Symposium 1979, New Delhi. Proceedings, Vol. I, p. 384...394.

HERLITZE, R. (1981): Untersuchungen langer Abflußreihen an Ober- und Mittelrhein. Diplomarbeit, Meteorologisches Institut der Universität Bonn (unveröffentlicht).

KASSER, P. (1973): Influence of Changes in the Glacierized Area on Summer Runoff in the Porte du Scex Drainage Basin of the Rhone. IASH Publ. No. 95.

SPREAFICO, M. (1980): Die Auswirkung alpiner Speicherseen auf die Umwelt. Pro Aqua Vita, Basel.

Chapitre 5/Kapitel 5:

CHR/KHR (1978): Le bassin du Rhin/Das Rheingebiet, Monographie Hydrologique/Hydrologische Monographie, Tome A/Teil A, Den Haag.

MADE, J. W. VAN DER (1982): Analyse quantitative des débits; Rapport no. II-1 sous l'égide de la CHR/Quantitative Analyse der Abflüsse; Bericht Nr. II-1 unter Schirmherrschaft der KHR. Den Haag, 85 p.

SCHILD, M.; GLIOTT, S. (1977, 1978): Schnee- und Lawinverhältnisse im Schweizerischen Alpengebiet. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung Nr. 40, Nr. 41, Weißfluhjoch/Davos.

WEMELSFELDER, P. J. (1963): Die Bedeutung des Grundwassers für die Abflußvorhersage, aufgezeigt am Beispiel des Rheins. 2. Konferenz der Arbeitsgemeinschaft der Donauländer für hydrologische Vorhersagen, Graz.

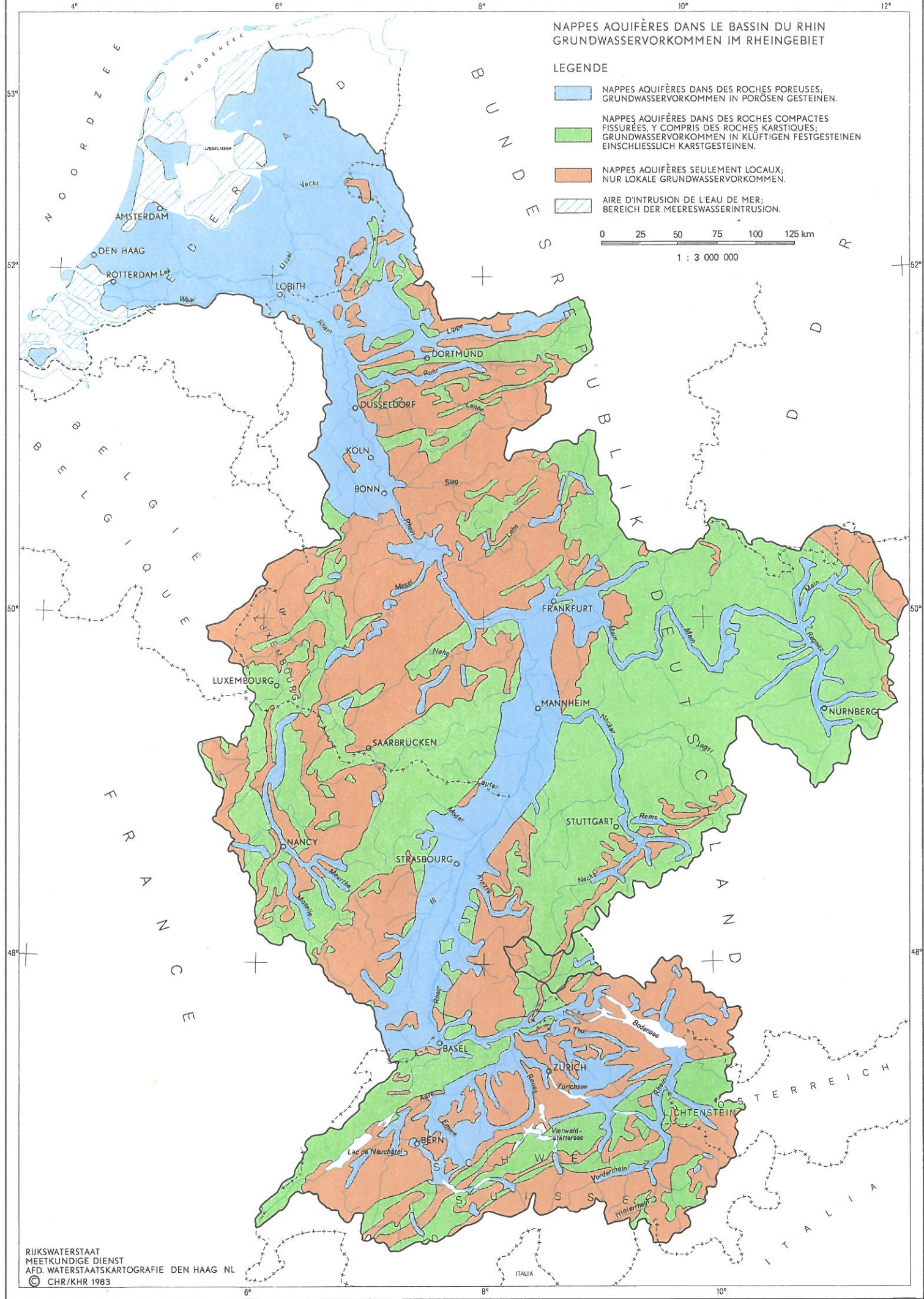
NAPPES AQUIFÈRES DANS LE BASSIN DU RHIN
 GRUNDWASSERVORKOMMEN IM RHEINGEBIET

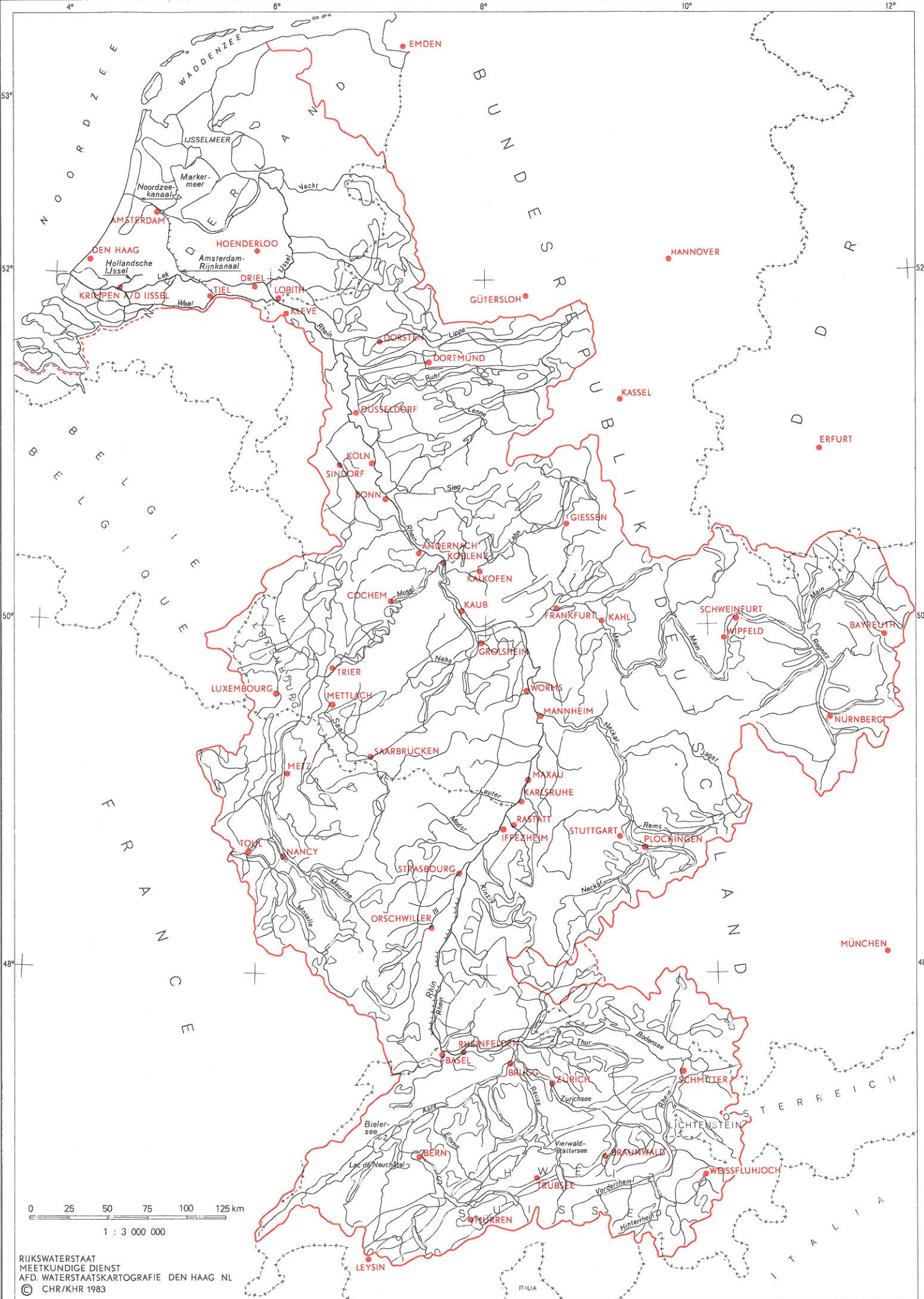
LEGENDE

- NAPPES AQUIFÈRES DANS DES ROCHES POREUSES;
 GRUNDWASSERVORKOMMEN IN PORÖSEN GESTEINEN.
- NAPPES AQUIFÈRES DANS DES ROCHES COMPACTES
 FISSURÉES, Y COMPRIS DES ROCHES KARSTIQUES;
 GRUNDWASSERVORKOMMEN IN KLÜFTIGEN FESTGESTEINEN
 EINSCHLIESSLICH KARSTGESTEINEN.
- NAPPES AQUIFÈRES SEULEMENT LOCAUX;
 NUR LOKALE GRUNDWASSERVORKOMMEN.
- AIRE D'INTRUSION DE L'EAU DE MER;
 BEREICH DER MEERESWASSERINTRUSION.

0 25 50 75 100 125 km

1 : 3 000 000





0 25 50 75 100 125 km
 1 : 3 000 000

RIJKSWATERSTAAT
 MEETKUNDIGE DIENST
 AFD. WATERSTAATSKARTOGRAFIE DEN HAAG NL
 © CHR/KHR 1983

Hauteurs mensuelles des précipitations pendant la période
1931...1960 et en 1976

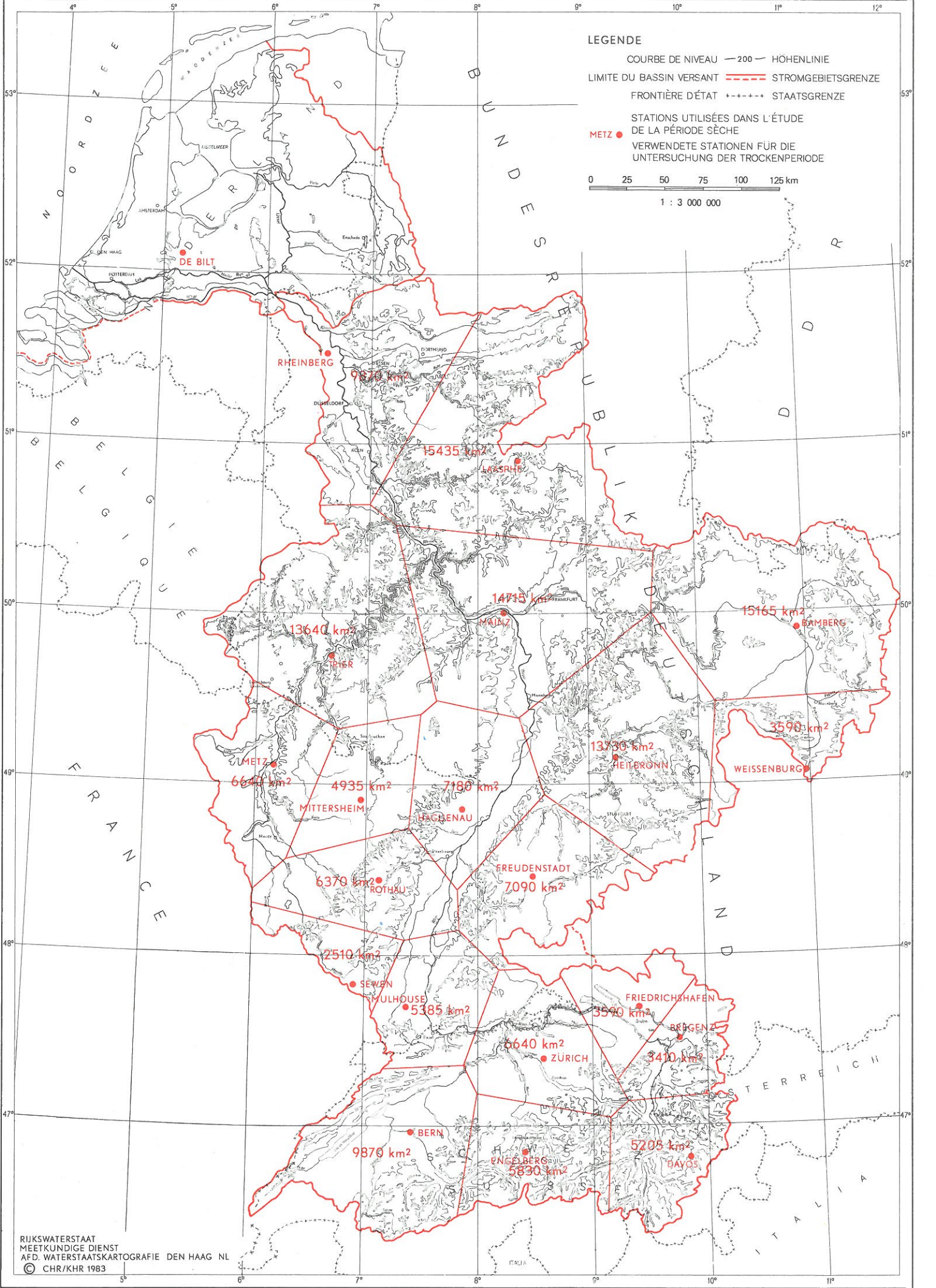
Monatliche Niederschlagshöhen in der Periode 1931... 1960 und im
Jahre 1976

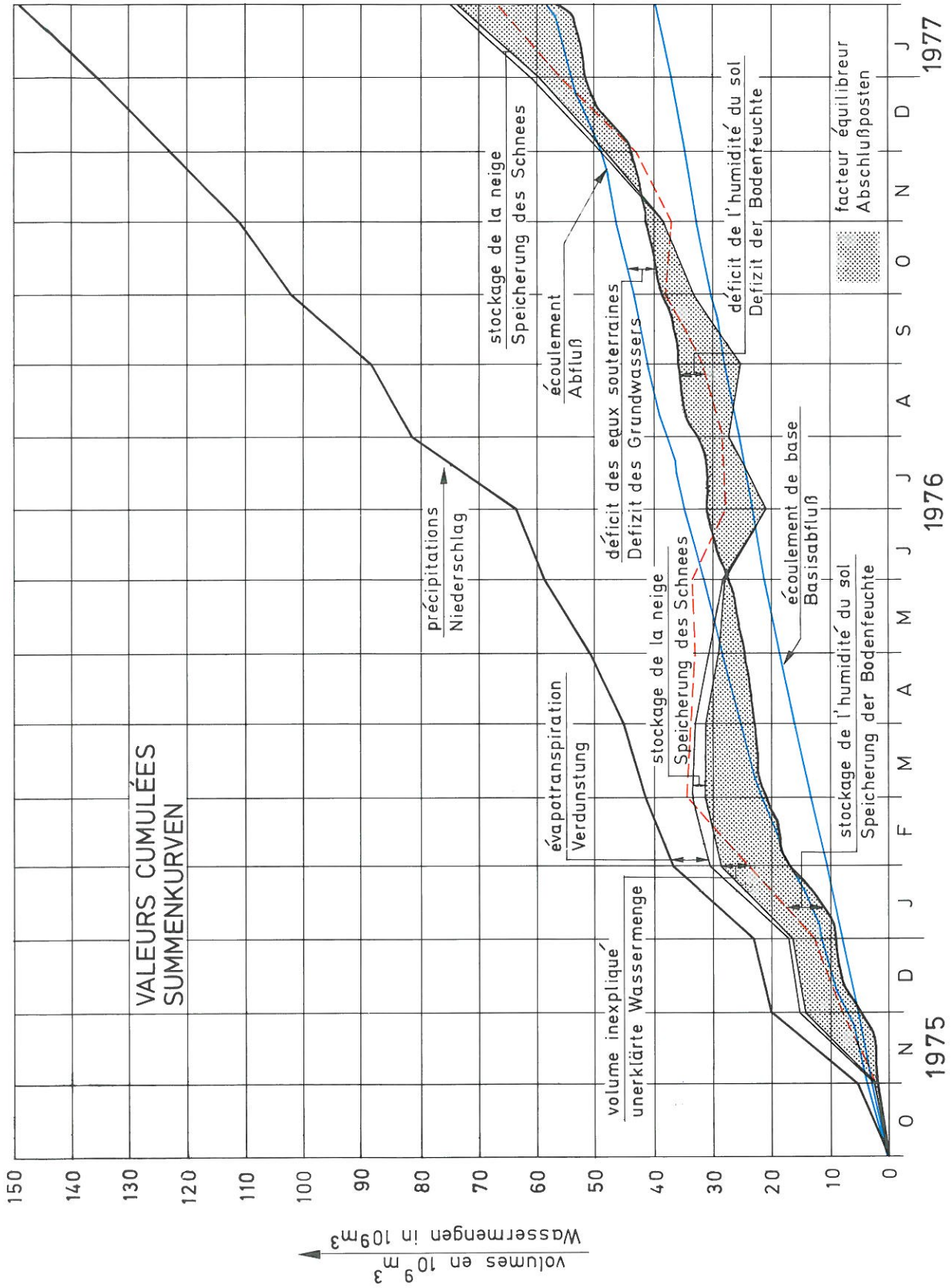
(km ²)	Davos (5205)		Bregenz (3410)		Friedrichshafen (3590)		Engelberg (5830)		Bern (9870)		Zürich (6640)		Mulhouse (5385)		Sewen (2510)		Freudenstadt (7090)		Haguenau (7180)		Rothau (6370)	
	1931	1976	1931	1976	1931	1976	1931	1976	1931	1976	1931	1976	1931	1976	1931	1976	1931	1976	1931	1976	1931	1976
	mm	mm %	mm	mm %	mm	mm %	mm	mm %	mm	mm %	mm	mm %	mm	mm %	mm	mm %	mm	mm %	mm	mm %	mm	mm %
J	76	95	93	146	63	59	112	77	61	22	74	54	69	27	301	262	166	271	72	43	145	91
		125		157		94		69		36		73		39		87		163		60		63
F	76	11	82	33	56	27	107	38	54	30	70	42	52	31	238	64	160	55	58	25	124	50
		14		40		48		36		56		60		60		27		34		43		40
M	60	10	80	49	53	20	104	48	59	19	66	13	50	16	179	43	103	27	47	10	80	14
		17		61		38		46		32		20		32		24		26		21		18
A	52	36	95	92	60	64	114	134	68	37	80	57	47	50	154	63	100	45	57	37	90	53
		69		97		107		118		54		71		106		41		45		65		59
M	79	77	145	183	95	116	136	92	93	67	107	81	62	27	121	49	96	64	63	37	81	68
		97		126		122		68		72		76		44		40		67		65		84
J	122	100	165	119	112	62	178	132	123	28	136	34	79	8	178	26	119	48	88	14	113	18
		82		72		55		74		23		25		10		15		40		16		16
J	144	188	215	321	137	238	191	215	119	179	143	228	71	66	158	118	116	128	80	68	105	202
		131		149		174		113		150		159		93		75		110		77		192
A	125	107	176	84	113	56	170	114	116	25	131	118	68	42	168	48	125	53	76	26	111	71
		86		48		50		67		22		90		62		29		42		34		64
S	86	205	135	179	93	101	137	108	101	105	108	104	70	78	177	167	110	138	74	75	104	66
		238		133		109		79		104		96		111		94		125		101		63
O	72	98	108	69	65	48	120	119	70	46	80	62	56	44	183	102	105	52	61	63	98	44
		136		64		74		99		66		78		79		56		50		103		45
N	66	76	85	149	59	63	108	85	68	52	76	59	64	49	249	223	127	128	64	46	107	83
		115		175		107		79		76		78		77		90		101		72		78
D	60	83	80	124	54	86	90	139	54	114	65	111	53	67	220	259	127	150	54	49	113	127
		138		155		159		154		211		171		126		118		118		91		112
jan...déc.	1018	1086	1459	1548	960	940	1567	1301	986	724	1136	963	741	505	2326	1424	1454	1159	794	493	1271	887
Jan...Dez.	107		106		98		83		73		85		68		61		80		62		580	426
mars...août	582	518	876	848	570	556	893	735	578	355	663	531	377	209	958	347	659	365	411	192	580	426
März...Aug.	89		97		98		82		61		80		55		36		55		47		73	

Hauteurs mensuelles des précipitations pendant la période
1931...1960 et en 1976

Monatliche Niederschlagshöhen in der Periode 1931... 1960 und im
Jahre 1976

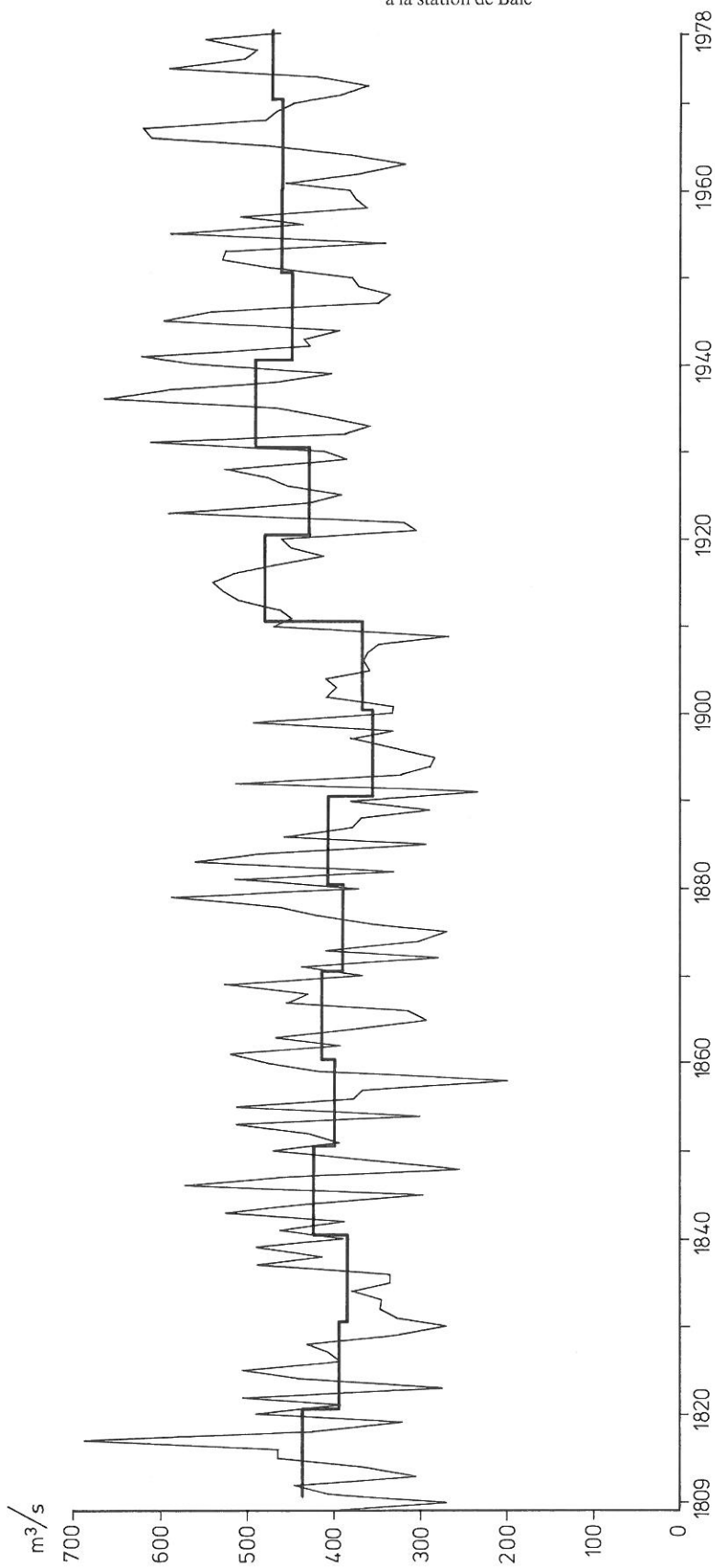
	Heilbronn (km ²) (13730)		Weissenburg (3590)		Bamberg (15165)		Mainz 14715		Mittersheim (4935)		Metz (6640)		Trier (13640)		Laasphe (5435)		Rheinberg (9870)		De Bilt		Bas. vers. Rhin Einz. geb. Rhein (160800)	
	1931	1960	1931	1960	1931	1960	1931	1960	1931	1960	1931	1960	1931	1960	1931	1960	1931	1960	1931	1960	1931	1960
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
J	58	70	45	81	50	84	41	68	80	93	68	40	64	46	103	172	63	82	69	100	79	88
	121		180		166		116		116		59		72		167		130		145		145	111
F	52	22	43	13	42	11	32	31	66	40	53	30	53	37	89	24	53	23	51	23	65	30
	42		30		97		61		61		57		70		27		43		45		45	46
M	43	26	35	10	35	23	30	8	53	21	41	27	40	34	64	31	41	26	44	31	55	23
	60		29		27		40		40		66		85		48		63		70		70	42
A	53	39	43	34	40	5	36	19	65	38	51	32	53	13	63	7	50	7	49	10	61	33
	74		79		53		58		58		63		25		11		14		20		20	54
M	71	32	69	35	61	32	47	18	60	62	53	24	61	33	61	30	58	51	52	25	73	48
	45		51		38		103		103		45		54		49		88		48		48	66
J	81	17	84	56	75	22	61	7	93	13	70	12	73	5	72	22	63	24	57	53	93	30
	21		67		11		14		14		17		7		31		38		93		93	32
J	80	57	93	96	85	88	64	88	77	60	58	63	67	56	84	92	78	28	78	45	96	110
	71		103		138		78		78		109		84		110		36		58		58	115
A	77	74	72	50	69	22	68	19	83	19	73	10	78	9	90	29	79	24	89	15	94	43
	96		69		28		23		23		14		12		32		30		17		17	46
S	62	132	59	72	51	53	44	45	75	80	65	57	61	59	73	48	65	62	71	64	76	85
	213		122		102		107		107		88		97		66		95		90		90	112
O	51	30	50	62	52	36	41	31	67	60	56	58	55	62	76	64	55	32	72	43	68	53
	59		124		76		90		90		104		113		84		58		60		60	78
N	56	67	43	36	46	33	41	50	72	63	60	67	59	96	88	109	62	64	70	59	71	73
	120		84		122		88		88		112		163		124		103		84		84	103
D	51	63	41	38	48	41	42	37	67	83	60	58	63	71	96	48	61	46	64	69	68	76
	124		93		88		124		124		97		113		50		75		108		108	112
jan...déc.	735	629	677	583	654	450	547	421	858	632	708	478	727	521	959	676	728	469	766	537	889	692
Jan...Dez.	86		86		77		74		74		68		72		70		64		70		70	78
mars...août	405	245	396	281	365	192	306	159	431	213	346	168	372	150	434	211	369	160	369	179	472	287
März...Aug.	60		71		52		49		49		49		40		43		43		49		49	61





Niedrigste Tagesmittel der Abflüsse und deren Mittelwerte über 10 Jahre
am Pegel Basel

Débits moyens journaliers minimaux et valeurs moyennes de 10 années
à la station de Bâle



**PUBLICATIONS DE LA CHR
KHR – VERÖFFENTLICHUNGEN**

Le bassin du Rhin, **Monographie Hydrologique**. Staatsuitgeverij, La Haye, 1978.
Das Rheingebiet, **Hydrologische Monographie**. Staatsuitgeverij, Den Haag, 1978. ISBN 90 12017750

**rapports de la CHR
Berichte der KHR**

- I-1 Prévisions objectives et quantitatives des précipitations dans le bassin du Rhin. Etat de la question en 1982. D. Grebner, 1982.
Objektive, quantitative Niederschlagsvorhersagen im Rheingebiet. Stand 1982. D. Grebner, 1982.
- I-2 La sécheresse et les basses eaux de 1976. H. Gerhard, J. W. van der Made, J. Reiff, L. P. M. de Vrees, 1983, 2^{ème} édition, 1985.
Die Trocken- und Niedrigwasserperiode 1976. H. Gerhard, J. W. van der Made, J. Reiff, L. P. M. de Vrees, 1983, 2. Auflage, 1985. ISBN 90 70980010

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

- II-1 Analyse quantitative des débits. J. W. van der Made, 1982.
Quantitative Analyse der Abflüsse. J. W. van der Made, 1982.

