



n° 9191

Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

Analyse quantitative des débits

Quantitative Analyse der Abflüsse

J. W. van der Made



Secretariaat CHR | KHR
Hoofskade 1

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

Rapport no. II-1 sous l'égide de la CHR
Bericht Nr. II-1 unter Schirmherrschaft der KHR

langue originale: néerlandais
Originalsprache: Niederländisch

© 1982, CHR/KHR

TABLE DES MATIÈRES

Partie A

TEXTE

| | page |
|---|------|
| 1. Introduction | 8 |
| 2. Le processus d'écoulement | 10 |
| 2.1 Généralités | 10 |
| 2.2 Complications du processus durant les périodes de gel | 15 |
| 3. Simulation du processus d'écoulement | 18 |
| 3.1 Elaboration de la théorie | 18 |
| 3.2 Détermination des paramètres | 21 |
| 4. Application de la méthode décrite au bassin du Rhin | 25 |
| 4.1 L'eau souterraine dans la bassin du Rhin | 25 |
| 4.2 Exécution des calculs pour la période de 1901...1980 pour Lobith | 27 |
| 4.3 Validité des résultats | 30 |
| 4.4 Observations complémentaires | 33 |
| 5. La méthode décrite prise comme point de départ pour des applications ultérieures | 35 |
| 5.1 Prévisions d'écoulement de base sur plusieurs mois | 35 |
| 5.2 Prévisions d'écoulement sur quelques jours | 42 |
| 5.3 Etablissement des bilans hydriques | 44 |
| 5.4 Génération de séries de débits possibles | 47 |
| 6. Synthèse et recommandations (français, allemand, néerlandais, anglais) | 50 |
| Bibliographie | 55 |

ANNEXES

| | |
|--|----|
| I. Nappes aquifères dans le bassin du Rhin | 57 |
| II. Calcul de l'écoulement de base – Programme de calcul pour calculatrice TI 59 | 59 |
| III. Tableaux pour la prévision de l'écoulement de base | 60 |

Partie B

| | |
|---|----|
| Hydrogrammes de l'écoulement total Q et de l'écoulement de base Q_b du Rhin pour les années 1901...1980 | 63 |
|---|----|

1. INTRODUCTION

La connaissance du processus d'écoulement d'un bassin fluvial est importante à divers points de vue. Pour la gestion des eaux, on doit connaître aussi exactement que possible les volumes d'eau disponibles dans un avenir prochain. La question de la répartition des eaux doit être réglée aussi judicieusement que possible, particulièrement pendant les périodes de sécheresse et cela n'est faisable que si l'on dispose d'informations suffisantes. Par ailleurs il y a lieu d'établir un bilan hydrique représentatif qui englobe tous les éléments composants. Ces éléments composants sont, dans l'ordre:

- les précipitations (pluie et neige),
- l'évaporation (soit directe, soit par l'intermédiaire de la végétation),
- le débit du fleuve (ou de la rivière),
- l'emmagasinement (eaux de surface, couche de neige, humidité des sols dans la zone non-saturée, eaux souterraines).

De même, pour les prévisions de crues ou hautes-eaux, et pour les mesures à prendre contre celles-ci, on doit avoir une connaissance suffisante du processus d'écoulement. On trouvera dans le chap. 2 une analyse de ce processus et la schématisation de celui-ci dans des modèles.

Des nombreux modèles utilisés en hydrologie, les uns sont simples et d'autres très compliqués. Ils sont, pour la plupart, orientés vers un objectif déterminé. Nous n'en donnerons pas dans ce rapport un aperçu des plus importants. Nous prions le lecteur de se référer à une publication de l'O.M.M. (Organisation Météorologique Mondiale) dans laquelle sont exposés les résultats d'une recherche de l'efficacité comparée de divers modèles [WMO, 1975]. Nous nous contenterons de mentionner ici le modèle du Sacramento du Service Météorologique National des Etats-Unis (U.S. National Weather Service). C'est un modèle universellement connu dans lequel est simulé l'ensemble du processus de transfert des précipitations en écoulement. De bons résultats ont été obtenus grâce à ce modèle [KITANIDIS et BRAS, 1978].

Dans le modèle que nous allons commenter ci-après, le mécanisme d'écoulement a été extrêmement simplifié (chap. 3). Le point de départ est constitué par les précipitations dites effectives; il s'agit de la partie de la précipitation qui est transférée dans le fleuve, soit en tant qu'écoulement de surface soit sous forme d'écoulement souterrain. Pour élaborer cette méthode, on a supposé que l'écoulement des eaux souterraines est proportionnel au volume emmagasiné, hypothèse qui a été émise par Wemelsfelder dans son étude sur les persistances d'écoulement [WEMELSFELDER, 1960, 1963].

1. EINLEITUNG

Die Kenntnis des Abflußprozesses eines Einzugsgebietes ist für eine Vielzahl von Zwecken wichtig. Im Rahmen der wasserwirtschaftlichen Aufgaben benötigt man möglichst genaue Angaben über die in der kommenden Zeit zu erwartenden Wassermengen. Insbesondere in Trockenperioden kommt es darauf an, die Wasserverteilung möglichst zweckmäßig zu regeln; dies ist nur möglich, wenn ausreichende Information vorhanden ist. Damit hängt die Aufstellung einer zweckmäßigen Wasserbilanz, in der alle relevanten Komponenten enthalten sind, unmittelbar zusammen. Diese Komponenten sind folgende:

- Niederschlag (Regen, Schnee)
- Verdunstung (direkt oder über den Pflanzenbewuchs)
- Abfluß von Wasserläufen
- Speicherung (oberirdisches Wasser, Schneedecke, Bodenfeuchte in der ungesättigten Zone, Grundwasser).

Auch für Hochwasservorhersagen und Hochwasser-Schutzmaßnahmen ist eine ausreichende Kenntnis der Abflußvorgänge notwendig. In Kap. 2 ist eine Betrachtung dem Abflußprozeß und dessen Schematisierung in Rechenmodellen gewidmet.

In der Hydrologie sind viele – teils einfache, teils sehr komplizierte – Abflußmodelle im Gebrauch. Oftmals sind sie auf ein bestimmtes Ziel ausgerichtet, z.B. auf Hochwasservorhersagen. Eine Übersicht der wichtigsten Modelle soll an dieser Stelle nicht gegeben werden. Hierzu sei auf eine WMO-Veröffentlichung verwiesen, in der eine vergleichende Untersuchung der verschiedenen Modelle beschrieben wird [WMO, 1975]. Erwähnt sei hier lediglich das Sacramento-Modell des US National Weather Service. Dies ist ein sehr universelles Modell, das den gesamten Weg des Wassers vom Niederschlag bis zum Abfluß simuliert. Mit diesem Modell sind gute Resultate erzielt worden [KITANIDIS und BRAS, 1978].

In dem nachstehend zu behandelnden Modell wird der Abflußmechanismus stark vereinfacht (Kap. 3). Ausgangspunkt ist der sogenannte effektive Niederschlag; dies ist derjenige Teil des Niederschlags, der letztlich in den Abfluß der Flüsse übergeht, sei es als Direktabfluß, sei es als Grundwasserabfluß. Bei dieser Methode wird die Annahme gemacht, daß der Grundwasserabfluß dem Grundwasservorrat direkt proportional ist, eine Annahme, die bereits früher von Wemelsfelder in seiner Untersuchung der Abflußbehandlungszustände gemacht wurde [WEMELSFELDER, 1960, 1963].

Pour la division, envisagée dans cette étude, des précipitations effectives dans l'écoulement de surface et souterrain, nous avons utilisé un coefficient de séparation α qui est fonction de la réserve en eaux souterraines. Celle-ci évolue donc en fonction du remplissage de: une partie moindre des précipitations effectives passant dans les eaux souterraines et une partie plus importante passant dans les eaux de surface. La séparation de l'écoulement effectif entre les composants, écoulement de base et écoulement de surface, est basée sur des considérations physiques. Cette façon d'opérer doit être considérée comme un perfectionnement par rapport aux méthodes d'analyse graphique qui sont conseillées dans diverses publications [UNESCO, 1972; WMO, 1977].

Cette méthode a déjà été exposée dans une publication précédente [MADE, VAN DER, 1977]. Le commentaire a été orienté vers le bassin fluvial du Rhin (chap. 4) et elle a été exploitée pour la série 1901...1980.

Cette méthode offre des possibilités d'emploi pour les prévisions d'écoulement, l'établissement de bilans hydriques et pour la génération de longues séries des débits (chap. 5).

Enfin, le chap. 6 donne un résumé des résultats obtenus et aborde un certain nombre de conclusions et recommandations.

Für die beabsichtigte Verteilung des effektiven Niederschlags in Direktabfluß und Grundwasserabfluß wird nun mit einem Verteilungskoeffizienten α gearbeitet, der vom Grundwasservorrat abhängt. Dieser hat einen solchen Verlauf, daß, je größer dieser Vorrat ist, ein desto kleinerer Teil des effektiven Niederschlages in Grundwasser und ein entsprechend größerer Teil in oberirdisches Wasser übergeht. Die Trennung des tatsächlichen Abflusses in die Komponenten Basisabfluß und Direktabfluß basiert auf physikalischen Erwägungen. Dies ist als eine Verbesserung gegenüber den graphischen Analysemethoden anzusehen, die in verschiedenen Veröffentlichungen empfohlen werden [UNESCO, 1972; WMO, 1977].

In einer anderen Veröffentlichung wurde die hier beschriebene Methode bereits erläutert [MADE, VAN DER, 1977]. Sie wird hier auf das Einzugsgebiet des Rheins mit der Abflußreihe 1901...1980 am Pegel Lobith angewandt (Kap. 4).

Die Methode bietet Anwendungsmöglichkeiten im Rahmen von Abflußvorhersagen, bei der Aufstellung von Wasserbilanzen und beim Generieren von langen Abflußreihen (Kap. 5).

Das abschließende Kap. 6 enthält eine Zusammenfassung sowie eine Reihe von Schlußfolgerungen und Empfehlungen.

6. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

La méthode d'analyse exposée dans ce rapport est basée sur une prévision très simplifiée du cycle hydrologique (chapitre 2). Cette méthode donne la possibilité de calculer jour par jour la partie du débit d'un cours d'eau qui provient de l'écoulement de base et celle qui provient de l'écoulement de surface. Par *écoulement de base* on entend le débit qui est restitué au cours d'eau après un emmagasinement de longue durée, qui peut s'étendre sur plusieurs mois. En fait, l'eau qui s'écoule en tant qu'*écoulement de surface* a pu rencontrer des obstacles en cours de route (écoulement retardé).

Les calculs nécessitent la connaissance de 2 paramètres, à savoir la durée de tarissement T et le facteur de séparation α (chapitre 3). La durée de tarissement T est le temps qui serait nécessaire au bassin fluvial, à partir d'un certain moment initial t_0 , pour perdre toutes ses réserves en eau constituées en grande partie par des eaux souterraines, – si le débit de base est constant dès ce moment. Le facteur de séparation α permet d'établir la relation entre le remplissage journalier de l'écoulement de base et l'écoulement de surface. Ce facteur est en corrélation avec l'état de saturation du sol: plus celui-ci contient d'eau, moins il pourra participer à l'écoulement de base; l'eau excédentaire précipitée participera principalement à l'écoulement de surface.

On trouvera dans le chapitre 4, une application de cette méthode au bassin fluvial du Rhin en amont de Lobith. Après détermination des paramètres, l'analyse des débits de la période de 1901 à 1980 a été effectuée. On en trouvera les résultats dans la partie B. D'une manière générale, il apparaît que l'évolution de l'écoulement de base s'adapte bien au contexte général de l'écoulement d'ensemble, si on ne tient pas compte d'un petit nombre d'exceptions qui doivent être imputées pour la plupart à l'embâcle.

La méthode d'analyse décrite peut apporter une contribution à la résolution d'un certain nombre de problèmes hydrologiques (chapitre 5), en particulier:

- les prévisions concernant l'écoulement de base sur plusieurs mois (par. 5.1).
- les prévisions d'écoulement sur quelques jours (par. 5.2),
- l'établissement de bilans hydriques (par. 5.3),
- le génération de séries de débits (par. 5.4).

Bien que la méthode, tout au moins en ce qui concerne les trois derniers sujets mentionnés ci-dessus, n'apporte encore aucune solution complète elle facilite

6. ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

Die im vorliegenden Bericht entwickelte Analyse-methode basiert auf einer stark vereinfachten Darstellung des hydrologischen Kreislaufs (Kap. 2). Die Methode ermöglicht es, von Tag zu Tag zu berechnen, welcher Anteil des Gewässerabflusses aus dem Basisabfluß stammt und welcher Anteil aus dem Direktabfluß. Hierbei wird unter *Basisabfluß* der Abfluß von Wasser verstanden, der erst nach längerer Speicherung – bis zu mehreren Monaten – in den Wasserlauf gelangt ist; das als *Direktabfluß* abfließende Wasser hat dagegen auf seinem Wege kaum eine Verzögerung erlitten.

Für die Berechnungen werden zwei Parameter benötigt, nämlich die Abminderungsdauer (Leerlaufzeit) T und der Trennungsfaktor α (Kap. 3). Die Abminderungsdauer T ist diejenige Zeitspanne, die das Einzugsgebiet benötigen würde, um nach einem bestimmten Stichtag t_0 seine gesamten Wasserreserven – größtenteils aus Grundwasser bestehend – zu verlieren, wenn der Basisabfluß ab dem gleichen Stichtag unvermindert andauern würde. Der Trennungsfaktor gibt das Verhältnis zwischen der täglichen Ergänzung des Basisabflusses und dem dann herrschenden oberirdischen Abfluß an. Dieser Faktor hängt mit dem Sättigungszustand des Bodens zusammen: je mehr Wasser dieser bereits enthält, umso weniger kann noch hinzukommen, um einen Beitrag zum Basisabfluß zu liefern; ankommendes Wasser kommt dann vor allem dem Direktabfluß zugute.

Kap. 4 beschreibt eine Anwendung auf das Einzugsgebiet des Rheins oberhalb von Lobith. Nach Feststellung der Parameter ist die Analyse für die gesamte Periode 1901...1980 ausgeführt worden. Das Resultat findet man in Teil B. Im allgemeinen zeigt sich, daß der Basisabfluß gut in das allgemeine Abflußbild passt, abgesehen von einer kleinen Zahl von Ausnahmefällen, die meistens einer Besetzung mit festem Eis zuzuschreiben sind.

Die beschriebene Analyse-methode kann einen Beitrag zur Lösung einer Reihe von hydrologischen Problemstellungen liefern (Kap. 5). Behandelt werden:

- Vorhersagen des Basisabflusses über mehrere Monate (Par. 5.1)
- Abflußvorhersagen über einige Tage (Par. 5.2)
- Die Aufstellung von Wasserbilanzen (Par. 5.3)
- Entwicklung von möglichen Abflußreihen (Par. 5.4)

Obgleich die Methode sicherlich für die letzten drei genannten Angaben noch keine vollständige Lösung bietet, bringt sie sie doch insofern einer Lösung näher,

cependant le traitement de certaines parties de ces questions.

Recommandations

Afin de permettre de vérifier les hypothèses sur lesquelles repose cette méthode, il convient d'étudier les aquifères et le comportement de l'eau de surface dans le bassin fluvial étudié à partir d'un inventaire détaillé. Ceci s'applique principalement aux plaines et aux vallées, mais aussi aux régions comportant de nombreuses zones à tectonique cassante et de roches karstiques. On peut utiliser dans ce but les données existantes; là où il n'y en a pas, une enquête complémentaire est recommandable.

Il est également conseillé d'étudier plus avant les possibilités d'application mentionnées dans le chapitre 5. En effet à l'exception de la prévision de l'écoulement de base sur plusieurs mois (par. 5.1) ces sujets exigent encore des recherches complémentaires importantes. celles-ci concernent les points suivants:

pour les prévisions d'écoulement sur quelques jours (par. 5.2):

- la grandeur de l'hauteur des averses effectives
- le transfert en hydrogramme,

pour l'établissement des bilans hydriques (par. 5.3):

- comparaison des niveaux d'eau souterraine,
- les éléments qui n'ont pas été traités ici, par exemple l'humidité des sols et l'évapotranspiration; les domaines de recherche hydrologique offrent des possibilités à ce point de vue.

pour la génération des séries de débits (par. 5.4):

- les points mentionnés dans la point «Prévisions d'écoulement»,
- la loi de distribution fréquentielle des averses effectives et celle des intervalles de temps entre les averses,
- un programme de génération des débits journaliers.

Conclusion finale

La méthode commentée dans ce rapport constitue une étape vers la solution d'un certain nombre de questions relatives à l'hydrologie et à l'hydraulique; des recherches complémentaires sont encore nécessaires.

als zumindest Einzelfragen dieser Problemkreise »behandelbarer« werden.

Empfehlungen

Um die Grundlagen, auf denen die Methode beruht, mehr im Einzelnen zu prüfen, empfiehlt sich eine umfassende Inventarisierung des Grundwasservorkommens und Grundwasserregiems im Einzugsgebiet des Rheins. Dies gilt vor allem für die Tiefebene und die Flußtäler, daneben aber auch für Gebiete mit vielen Bruchzonen und Karsterscheinungen. Zweifellos kann hierbei auf bereits vorhandene Daten zurückgegriffen werden; wo diese nicht zur Verfügung stehen, wird eine ergänzende Untersuchung empfohlen.

Überdies empfiehlt es sich, die in Kap. 5 behandelten Anwendungsmöglichkeiten weiter auszuarbeiten. Mit Ausnahme der Vorhersage des Basisabflusses über mehrere Monate (Par. 5.1) dürften diese Themen noch umfassende, ergänzende Untersuchungen notwendig machen. Dies betrifft vor allem:

Abflußvorhersagen über einige Tage (Par. 5.2):

- die Höhe des »effektiven Niederschlag-Impulses«,
- die Transformation in ein Abflußelement.

Die Aufstellung von Wasserbilanzen (Par. 5.3):

- die bereits genannte Überprüfung der Grundwasserspiegel,
- die hier nicht behandelten Komponenten, z.B. Bodenfeuchte und Verdunstung; die hydrologischen Untersuchungsgebiete bieten hierzu geeignete Möglichkeiten.

Entwicklung von Abflußreihen (Par. 5.4):

- die unter »Abflußvorhersagen« genannten Punkte,
- die Häufigkeitsverteilungen von effektiven Niederschlagsimpulsen und Zeitintervallen.
- ein Generierungsprogramm.

Schlußfolgerung

Die hier behandelte Methode stellt einen Schritt in Richtung der Lösung einer Reihe hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Probleme dar; es sind jedoch noch weitere Untersuchungen notwendig.