

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ – HYDROLOGIE

NR. 34

Herausgegeben von der Schweizerischen Geotechnischen Kommission und der
Hydrologischen Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften

**NIEDERWASSER:
BESTIMMUNG, NUTZUNG
UND ERHALTUNG**

Hydrologietagung an der ETH Zürich, 13. April 1989

mit Beiträgen von

F. Aemmer, D. Consuegra, S. Gygax, M. Jäggi, H. Jensen,
H. Lang, Ch. Leibundgut, P. Michel, A. Musy, U. Schröder,
H.U. Schweizer, U. Sieber, B. Sigrist, F. Zwahlen

Redaktion:

E. Kölla
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie

VORWORT

Die Hydrologietagung über Niederwasser vom 13. April 1989 an der ETH in Zürich hat mit über 150 Teilnehmern grosses Interesse bei Wissenschaft und Praxis gefunden. Mit Ausnahme des Referates von H. Marrer über die Wasserfauna sind hier alle Manuskripte abgedruckt. Sie beinhalten mehrere Themen, wie z.B. die Bestimmung von Niederwasserabflussmengen durch Messung, Schätzung oder Prognose, die weit weniger trivial ist, als dass es unvoreingenommen den Anschein macht. Andere Beispiele betreffen die ökologischen Aspekte, die bei Abwasser- und Kühlwassereinleitungen bedeutsam sind, oder die ökonomischen Probleme, die beachtet werden müssen: sei es bei der Grundwassernutzung oder beim Betrieb von Kraftwerken. Beispiele technischer Massnahmen wurden für Seenregulierungen und für Niederwasserrinnen in Flüssen erläutert.

Das gute Echo auf die Ausschreibung durch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie hat gezeigt, dass auch ein Thema ausserhalb der Hochwasser- und Katastrophenhydrologie genügend Aktualität aufweist, um auf nationaler Ebene besprochen zu werden.

Die Hydrologische Kommission hat diese Tagung zum Anlass genommen, die mögliche Gründung einer Schweizerischen Hydrologischen Gesellschaft einem breiten Hydrologen - Publikum bekanntzugeben. Seit einiger Zeit ist sie sich bewusst, dass die schweizerische Hydrologie eine breite und offene Diskussionsbasis nötig hat, dass ein überregionales und gesamtschweizerisches hydrologisches Forum diskussionsreif geworden ist. Seit der Gründung der Hydrologischen Kommission im Jahre 1948 hat sich die wissenschaftliche aber auch die angewandte Hydrologie stark gewandelt. Neben der klassischen Abflussmengenhydrologie sind Wasserbilanz, Niederschlag/Abfluss-Modelle, Hochwasserhydrologie und Geschiebetransport, Bodenwasserhaushalt, die Beziehungen zum Grundwasser, die Alpin- und Schnee-hydrologie und in neuerer Zeit Eintrag, Transport und Austrag gelöster Stoffe in hydrologischen Systemen, sowie weitere Arbeitsfelder in Forschung und Anwendung intensiviert worden. Es ist hier nicht der Platz, alle Aspekte des heutigen Hydrologie-Begriffes erschöpfend aufzuzählen. Es genügt zu erkennen, dass die Hydrologie als verbindende Wissenschaft einen Platz einzunehmen beginnt, dem auch organisatorisch Rechnung getragen werden soll.

So ist die Hydrologische Kommission gespannt zu sehen, wie und wohin sich die Hydrologen der Schweiz bewegen. Der 13. April 1989 war ein guter Anfang. Ich danke dem Initianten, Prof. D. Vischer, den Organisatoren, vorab Frau Dr. E. Kölla, den Referenten, die ihre Manuskripte für diese Publikation zur Verfügung gestellt haben, sowie allen Teilnehmern herzlich. Ich wünsche der Hydrologie, denen die sie erforschen, anwenden und betreiben, weiterhin viel Erfolg.



Dr. Hans M. Keller
(Präsident der Hydrologischen Kommission SANW)

Birmensdorf, im Oktober 1989

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

Bestimmung des Niederwassers

Consuegra, D., Musy, A.: Basses eaux ou étiages - Définition, utilisation et analyse	7
Sigrist, B.: Messung des Niederwassers	31
Leibundgut, Ch., Schröder, U.: Schätzung des Nieder- wassers	43
Jensen, H., Lang, H.: Ueber die Vorhersage von Niederwasserabflüssen	59

Oekologische und ökonomische Aspekte des Niederwassers

Schweizer, H.U., Michel, P., Sieber, U.: Niederwasser als Vorflut für Abwasser- und Kühlwasserein- leitungen	75
Zwahlen, F.: Basses eaux et exploitation des eaux souterraines	87
Aemmer, F.: Niederwasser und Kraftnutzung	101

Technische Massnahmen

Gygax, S.: Niederwasseraufhöhung im Rahmen von Seeregulierungen	111
Jäggi, M.: Flussbauliche Massnahmen	127

BASSES EAUX OU ETIAGES

Définition, utilisation et analyse

D. Consuegra, A. Musy
Institut de Génie Rural
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Lausanne

RESUME

La notion d'étiage est étroitement liée à usage de l'eau et aux objectifs de l'étude. Parmi toutes les définitions possibles, le concept de **débit minimum** présente aujourd'hui, un intérêt particulier. En effet, le projet de loi pour la protection des eaux consacre un chapitre spécial sur la nécessité de maintenir des débits minimums dans les cours d'eau suisses. Toutes les exigences de la loi sont basées sur la formule empirique de Matthey qui détermine le débit minimum en dessous duquel la vie aquatique n'est plus possible. L'application de cette formule passe nécessairement par l'estimation de la valeur **Q347** (débit atteint ou dépassé en moyenne 347 jours par année). Après une présentation succincte des diverses définitions des étiages, cette communication tente d'évaluer l'aptitude des différentes méthodes de prévision et de détermination des étiages en vue de satisfaire aux exigences de la nouvelle loi.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Begriff Niedrigwasser steht in engem Zusammenhang mit dem Gebrauch des Wassers und mit der Zielsetzung dieser Studie. Mehrere Definitionen dieses Begriffes existieren. Von besonderem Interesse ist heute das Konzept des **Mindestabflusses**. Der Entwurf für das neue Gewässerschutzgesetz widmet ein spezielles Kapitel der Notwendigkeit für die Beibehaltung eines minimalen Abflusses in schweizerischen Fliessgewässern. Der Entwurf stützt sich in allen seinen Bestimmungen auf die Formel von Matthey. Diese Formel erlaubt es, den Minimalabfluss zu berechnen, unterhalb dessen die Existenz der Lebewesen im Wasser nicht mehr möglich ist. Zur Anwendung dieser Formel muss der Wert **Q347** bestimmt werden (Abflusswert, der im Mittel während 347 Tagen im Jahr erreicht oder überschritten wird). Am Anfang des vorliegenden Beitrages werden in Kürze die verschiedenen Definitionen von Niedrigwasser und Niedrigwasserabfluss dargestellt. Anschliessend werden die verschiedenen Methoden zur Vorhersage und Bestimmung von Niedrigwasser auf ihre Fähigkeiten, den Anforderungen des neuen Gewässerschutzgesetzes zu entsprechen, geprüft.

1. INTRODUCTION

L'étude des crues a préoccupé l'homme depuis fort longtemps. Il n'en n'a pas été de même en ce qui concerne les faibles débits. Si l'on excepte certaines régions sèches dans lesquelles les problèmes de ressources en eau ont été étudiés pour divers usages (alimentation, irrigation), ce n'est que très récemment que l'on a été amené à se préoccuper dans les pays à climat tempéré, des carences en eau et plus spécifiquement des basses eaux des rivières.

Notre société utilise de plus en plus d'eau pour ses besoins domestiques, agricoles, industriels et communautaires. Mais le hasard climatique et les saisons font qu'il n'y a que rarement concomitance entre les ressources et les besoins. L'homme se trouve donc obligé d'orienter ses activités en fonction des ressources non seulement qu'il dispose mais qui lui garantissent aussi une certaine pérennité. La connaissance des basses eaux ou des étiages présente dès lors le plus grand intérêt.

Le phénomène des étiages peut être étudié sous différents aspects techniques, notamment en prévision ou en détermination.

La "**prévision**" consiste à évaluer dans le futur les faibles débits d'un cours d'eau à un instant donné, moyennant l'exploitation déterministe ou stochastique d'une série d'informations plus ou moins récentes.

La "**détermination**" vise plutôt la connaissance des étiages au cours d'une période donnée en exploitant statistiquement un faisceau d'informations recueillies au cours d'une période antérieure assez longue.

La prévision comporte donc une notion de **temps réel** en ce sens que les conditions actuelles servent à prévoir un comportement dans un avenir plus ou moins rapproché.

La détermination inclut plutôt un concept probabiliste puisqu'il s'agit d'associer des périodes de récurrence, ou des temps de retour, aux débits. Dans ce cas, la date d'occurrence de l'événement considéré n'est pas définie.

La prévision des étiages intéresse surtout les usagers de la navigation fluviale, les agriculteurs et les riverains (pollution, alimentation en eau potable, pêche) tandis que la détermination des étiages préoccupe les industriels les ingénieurs des Ponts et Chaussées, les exploitants de barrages-réservoirs ou de centrales thermiques à refroidissement par eau.

Par ailleurs la prise en considération des questions relatives à la protection de l'environnement oblige le maintien de débits minimaux "convenables" dans les cours d'eau. Ces débits minimaux doivent garantir la vie aquatique et assurer entre autres, des taux de dilution suffisants, de manière à atténuer les effets nuisibles de la pollution chimique et organique. Le législateur suisse a très bien compris ce besoin puisqu'il consacre un chapitre spécial du projet de loi sur la protection des eaux aux débits minimaux.

Après avoir rappelé quelques définitions, cette communication propose une revue sommaire des méthodes de prévision et de détermination des débits d'étiage, spécialement dans le contexte du nouveau cadre légal prévu par la future loi sur la protection des eaux. Elle tente d'évaluer finalement l'aptitude des différentes méthodes à répondre aux exigences de cette nouvelle législation.

2. LES ÉTIAGES - DÉFINITION

On appelle **étiage** le plus bas **niveau** des eaux d'un cours d'eau. Le **débit d'étiage** est le débit correspondant à ce niveau. On distingue alors :

- | | | |
|--|---|---|
| 1 Débit annuel d'étiage | : | débit journalier le plus faible observé au cours de l'année (hydrologique ou calendaire) |
| 2 Débit absolu d'étiage [DE] | : | débit journalier le plus faible survenu au cours de la période d'observation (sur plusieurs années) |
| 3. Débit caractéristique d'étiage [DCE] | : | débit dépassé 355 jours par an |
| 4. Débit caractéristique moyen d'étiage [DCE moyen] | : | débit dépassé en moyenne 355 jours par an au cours d'un certain nombre d'années |
| 5. Débit caractéristique de 10 ou de 11 mois [DC10, DC11] | : | débit dépassé 10, respectivement 11 mois par année |
| 6. Débit caractéristique moyen de 10 ou de 11 mois [DC10m, DC11m] | : | débit dépassé en moyenne 10, respectivement 11 mois par an au cours d'un certain nombre d'années |

On considère aussi comme débit d'étiage la **plus faible valeur** de la moyenne mobile des débits d'étiage au cours d'une période de n jours consécutifs d'une année [VCNn] ou encore le débit n'ayant pas été dépassé pendant n jours consécutifs [QCNn]. QCNn est en général plus grand que VCNn.

Le débit d'étiage à considérer selon les définitions ci-dessus sera surtout fonction du but de l'étude. Pour le pompage au fil de l'eau ou la pollution, il faudra déterminer QCNn, tandis que pour les retenues en rivière, c'est plutôt VCNn le paramètre important. Dans le cadre d'un dimensionnement d'une retenue pour l'approvisionnement en eau potable ou la production d'électricité, le volume de stockage est calculé à partir d'un apport moyen minimum sur n jours consécutifs.

Pour la pollution, ce n'est pas un minimum absolu qu'il importe de prendre en considération mais plutôt la valeur moyenne sur n jours au dessous de laquelle les taux de dilution ne sont pas suffisants pour absorber la charge polluante.

Les quantités DE, DCE, DC10 ET DC11 introduites ci-dessus peuvent s'obtenir à partir d'une **courbe de débits classés**. Il s'agit d'une méthode de détermination probabiliste des débits d'étiages. Cette courbe (cf. figure 1) exprime le nombre de jours durant lesquels la valeur du débit moyen journalier a été atteinte ou dépassée. Elle est établie en principe à partir de **valeurs observées sur plusieurs années**.

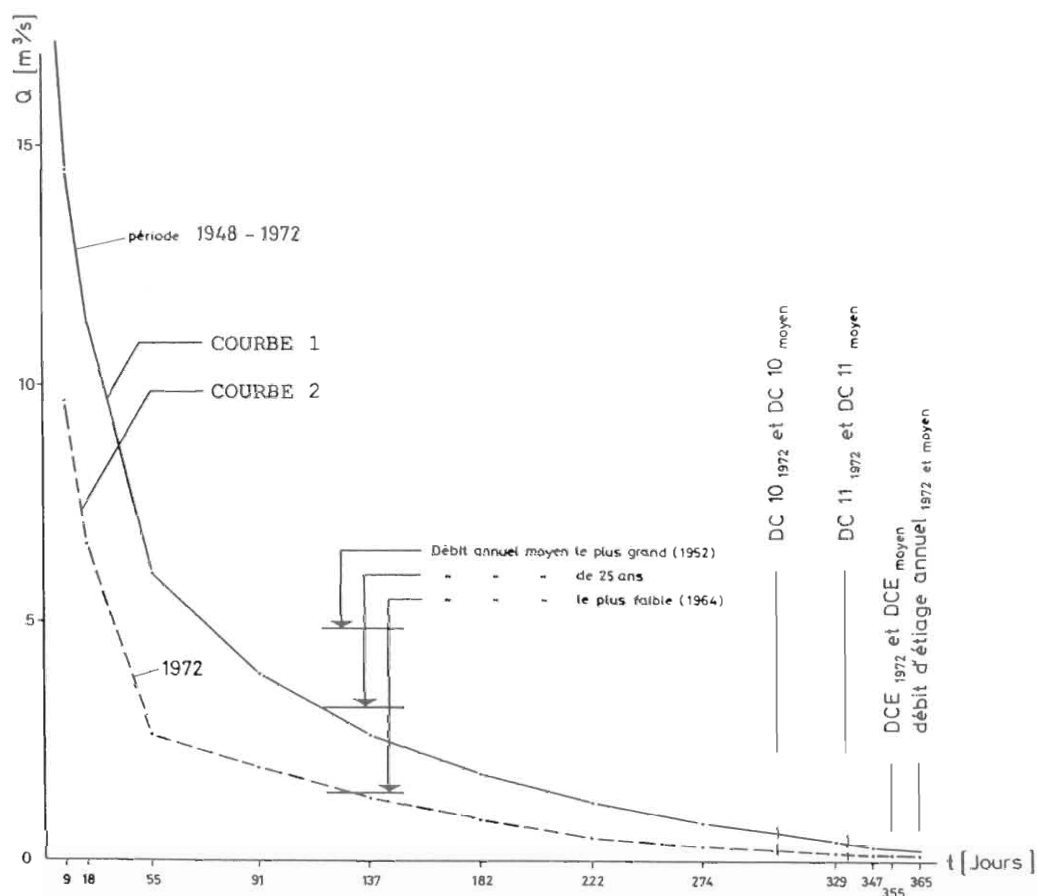


Figure 1 : La Venoge à Lussery, courbe des débits classés

Sur la figure ci-dessus, la courbe 1 représente la moyenne des courbes de débits classés, calculées pour la période 1948-1972. Cette courbe permet d'estimer le débit annuel d'étiage, DCEmoyen, DC10m et DC11m. La courbe 2 correspond à la courbe des débits classés, calculée pour l'année 1972 uniquement. Cette année fut particulièrement sèche. A partir d'une telle courbe, nous pourrions par exemple estimer DE.

Le débit d'étiage se définit parfois et encore autrement. Ainsi, pour la Commission cantonale vaudoise consultative de gestion des ressources en eau, le débit d'étiage correspond au débit moyen de 60 jours de basses eaux par an, calculé sur une période de 10 ans au minimum. Pour les Services romands de conservation de la faune, le débit d'étiage est égal à la moyenne des "basses eaux", c'est-à-dire aux "**débits les plus fréquents du cours d'eau**" (partie de la courbe comprise entre les points d'inflexion, voir figure 2 ci-dessous). En pratique, cette moyenne se situe généralement entre le 280ème et le 320ème jour sur la courbe des débits classés.

Il est important de noter que les quantités définies ci-dessus sont des **débits naturels**; c'est à dire des débits non influencés par d'éventuels prélèvements ou apports à l'amont.

De par ces définitions, on peut remarquer que la notion d'étiage est très liée à l'usage de l'eau. Il conviendra en conséquence d'**adapter la définition de l'étiage à l'analyse hydrologique effectuée.**

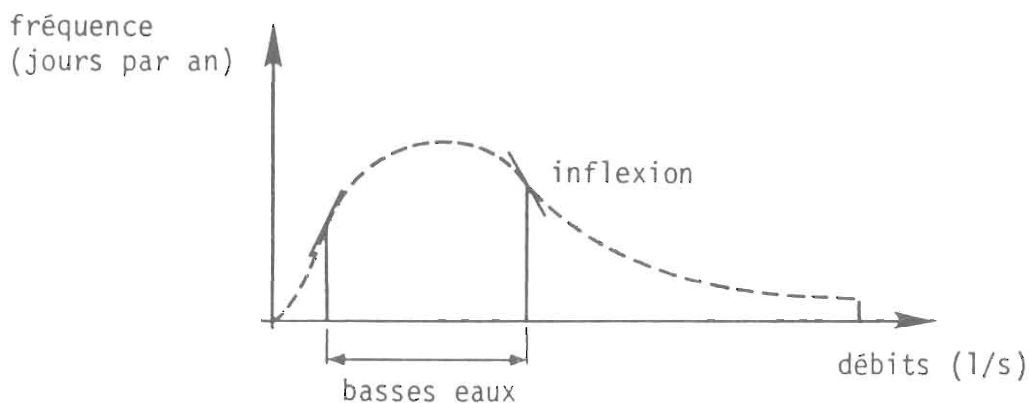


Figure 2 : Définition des "basses eaux" selon le Service de la conservation de la faune du canton de Vaud

2. LE PROJET DE LOI POUR LA PROTECTION DES EAUX

Le projet de loi pour la protection des eaux consacre un chapitre au maintien des débits **convenables** dans les cours d'eau de Suisse (titre deuxième chapitre 2). Le but de cette loi est de protéger les cours d'eau contre la pollution et "les interventions pratiquées lors de la correction d'un cours d'eau, par exemple lors de la modification des rives par déblayage ou remblayage ou de préjudices portés aux eaux souterraines par des retenues ou des drainages". Les modifications à la structure des réseaux hydrographiques par des rétentions ou des prélèvements sont aussi prises en considération.

Le champ d'application de la loi ne concerne que les cours d'eau à **débit permanent**, c'est-à-dire ceux qui "transportent de l'eau plus de **347 jours** en moyenne par année en se basant sur une période de mesure d'au moins 10 ans".

Selon ce projet de loi, un débit "convenable" dans un cours d'eau sera calculé à partir d'un **débit minimum** ou résiduel (article 31) et par un **relèvement** de celui-ci (article 33). Le débit minimum doit garantir la sauvegarde de la vie aquatique. Il s'agit d'une valeur minimum à respecter en **toutes circonstances**. Par contre, le relèvement de ce débit minimum est obtenu par comparaison des "intérêts parlant en faveur d'un prélèvement et les impératifs parlant en sa défaveur". Il sera donc le résultat d'une analyse cas par cas (étude d'impact).

Pour les cours d'eau peu ou non influencés par des activités humaines, le débit minimal déterminera la valeur maximale d'un éventuel prélèvement. En d'autres termes, le débit résiduel, à savoir le débit qui subsiste après les prélèvements, ne devra jamais être inférieur au débit minimum.

La figure 3 montre un schéma de dérivation d'eau et introduit le concept du débit de dotation défini ci-après.

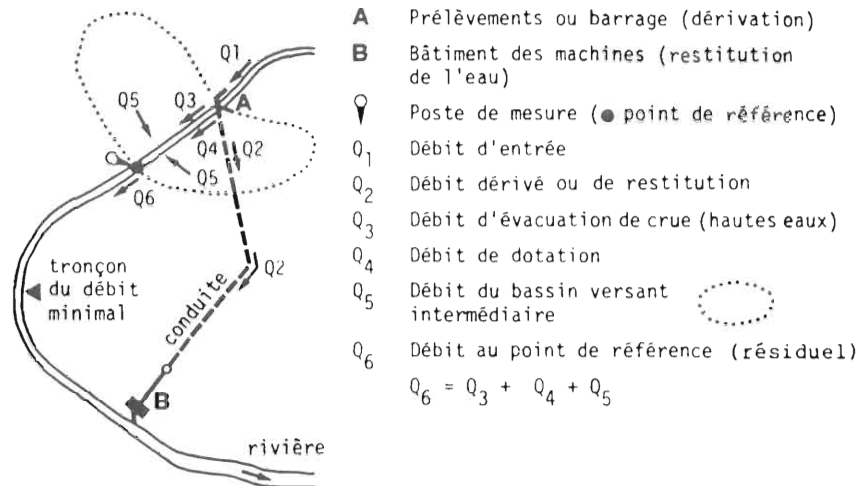


Figure 3 : Schéma de dérivation des eaux à partir d'un cours d'eau (ex. production d'énergie) (tiré de [1])

Le **débit de dotation** est défini comme le débit nécessaire au soutien du débit résiduel. Pour le cas d'un barrage, il s'agit du débit que la retenue doit laisser passer de façon à garantir en toutes circonstances le débit minimal. En cas de sécheresse $Q_5 = Q_3 = 0$ et le débit de dotation Q_4 est égal au débit résiduel Q_6 .

La figure 4 montre l'influence sur la courbe des débits classés d'un prélèvement constant sur toute l'année à l'amont du point de mesure. Elle montre aussi les conséquences sur la capacité de charriage ou de transport des matières solides. On peut constater une réduction des débits et des volumes solides transportés. Il en résulte une diminution du pouvoir d'auto-épuration de la rivière. Cette figure montre aussi les effets de la nouvelle loi sur le maintien des débits minimaux. En n'affectant que les valeurs plus fréquentes des débits, la réduction de la capacité de transport n'est pas significativement modifiée.

L'application de la loi sur le maintien d'un débit "convenable" dépend de la détermination du débit minimum. Le calcul proposé se fonde essentiellement sur la formule empirique de Matthey qui exprime le débit minimum en fonction de Q_{300} (débit dépassé en moyenne 300 jours par année).

$$Q_{\min} = \frac{15 Q_{300}}{[\ln Q_{300}]^2} \quad (\text{formule de Matthey})$$

avec $Q_{\min}$ = débit minimum [l/s]
 Q_{300} = débit dépassé ou atteint en moyenne 300 jours/année

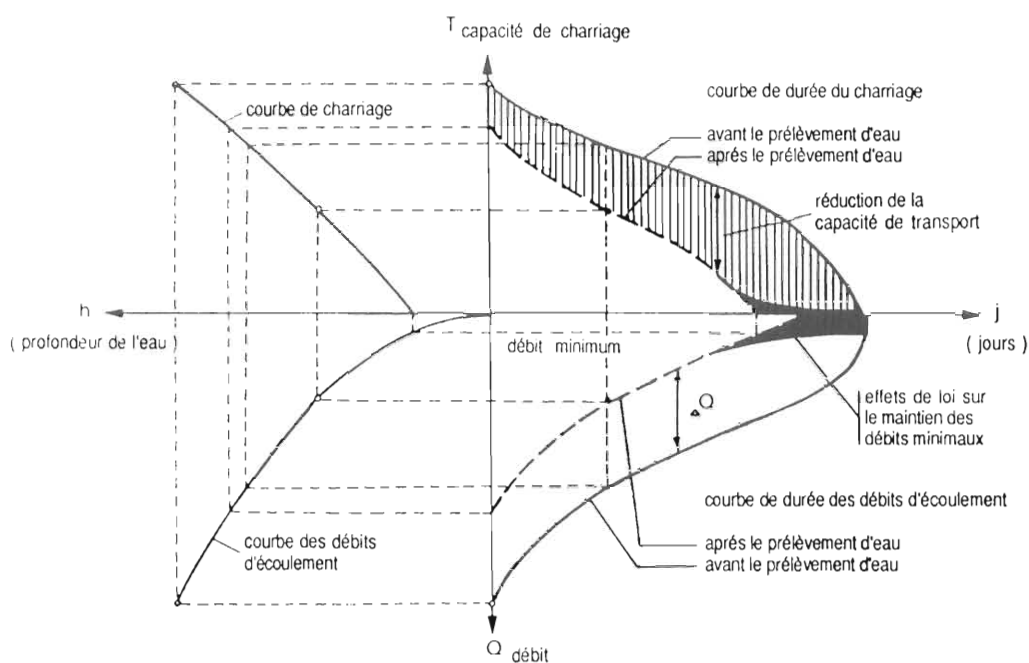


Figure 4 : Influences d'un prélèvement sur la courbe des débits classés et sur la capacité de charriage du cours d'eau (tiré de [2])

Cette formule permet de calculer une valeur de débit limite en dessous de laquelle la vie aquatique n'est plus possible. Cette équation traduit un concept empirique selon lequel, un cours d'eau de peu d'importance a besoin d'un débit minimum plus élevé qu'un grand cours d'eau (cf. figure 5).

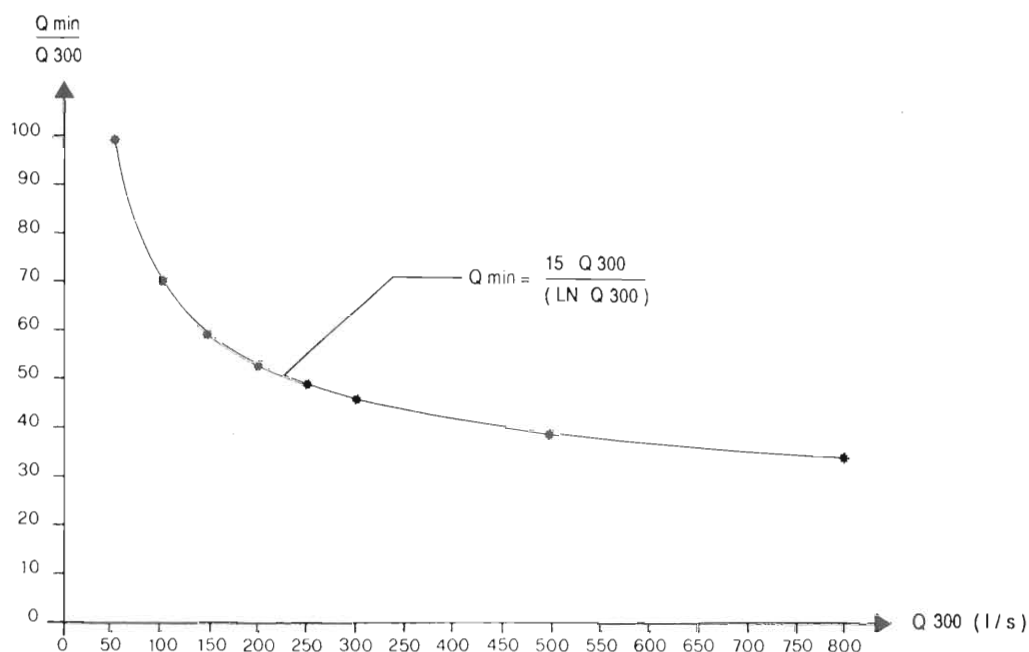


Figure 5 : Variations du rapport $\frac{Q_{min}}{Q_{300}}$ en fonction de Q_{300} avec la formule de Matthey (tiré de [2])

Dans le projet de loi, les cours d'eau ont été divisés en 3 classes, en fonction de la valeur de leur débit **Q347**

$Q_{347} \leq 60 \text{ l/s}$	cours d'eau de faible importance
$60 < Q_{347} \leq 60'000 \text{ l/s}$	cours d'eau de moyenne importance
$Q_{347} > 60'000 \text{ l/s}$	cours d'eau de grande importance

Pour les cours d'eau de **faible importance** à équilibre écologique très fragile, l'utilisation des eaux n'est possible que si on conserve un **débit supérieur à 50 l/s**.

Les cours d'eau de **moyenne importance** sont subdivisés en deux catégories. Pour ceux dont le débit Q_{347} varie entre 60 et 160 l/s, le débit minimum Q_{min} correspond à $0.8 \cdot Q_{347}$. La loi justifie cette modification de la formule Matthey en rappelant que "les rivières dans cette catégorie fournissent souvent aux grandes usines hydroélectriques des quantités d'eau considérables" et que les débits minimaux calculés avec la formule de Matthey fourniraient des valeurs supérieures à 80% du Q_{347} , en conséquence trop contraignantes. Pour les rivières dont le Q_{347} est compris entre 160 et 60'000 l/s, la **formule Matthey** est considérée comme **adéquate**.

Finalement pour les cours d'eau de **grande importance** un débit minimal fixe est imposé et correspond à $Q_{min} = 10'000 \text{ l/s}$.

Il est important de noter que dans l'intervalle $160 < Q_{347} \leq 60'000$, la formule de Matthey a été adaptée de façon à s'exprimer en fonction de Q_{347} (disponible dans les annuaires hydrologiques SGHN) plutôt qu'à partir de Q_{300} (donnée non publiée).

La figure 6 montre les débits minimaux à respecter selon les termes de l'article 31.

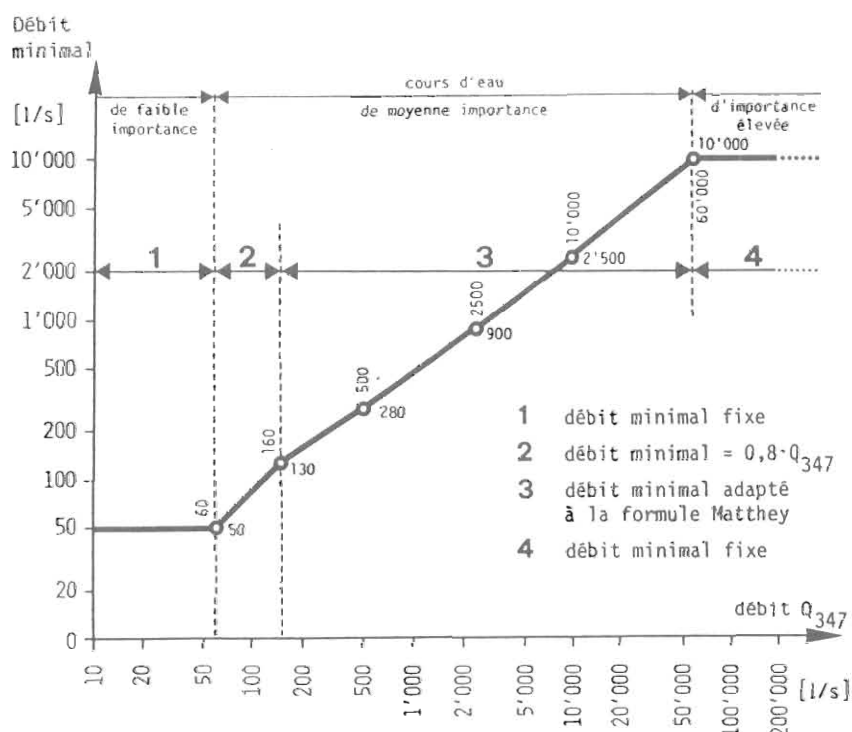


Figure 6 : Débits minimaux proposés par le projet de loi (tiré de [1])

En admettant la validité de l'équation de Matthey d'une part et des modifications illustrées dans la figure 6 d'autre part, nous pouvons constater que l'estimation de Q_{min} repose sur la détermination de Q_{347} . Or les mesures font souvent défaut, rendant impossible de ce fait la détermination d'une courbe de débits classés. L'article 59 du projet de loi s'exprime ainsi à ce sujet. "En l'absence de mesures suffisantes pour évaluer une eau, le débit Q_{347} sera déterminé selon d'autres méthodes, telles que des observations hydrologiques ou des simulations". On retrouve aussi dans le commentaire de la loi les propos suivants :

"Vu que l'évaluation des débits Q_{347} donne généralement lieu à des résultats trop peu fiables, vu aussi que les calculs établis à l'aide des diverses méthodes peuvent souvent aboutir à des résultats différents, le service hydrologique et géologique national (SHGN) établira des directives sur la manière d'évaluer les débits Q_{347} (art. 56, 4e al.)".

Il apparaît donc de façon évidente que l'estimation adéquate de la valeur Q_{347} est d'une importance capitale pour satisfaire les exigences de la loi.

3. ANALYSE DES ÉTIAGES ET MÉTHODES D'ESTIMATION

3.1 Analyse des étiages

Les débits d'étiage sont directement fonction de l'alimentation provenant des nappes souterraines. En absence de pluies, l'évaporation et la transpiration végétale épuisent progressivement les réserves en eau du réservoir sol et les débits décroissent régulièrement. La courbe qui représente cette décroissance en fonction du temps est appelée **courbe de tarissement**. Le tarissement sera **non-influencé** en absence de pluie (cf. figure 7a) ou **influencé** dans le cas où de nouvelles pluies viendraient alimenter les réserves (cf figure 7b). En général, les courbes de tarissement sont représentées en coordonnées semi-logarithmiques, permettant ainsi de mieux apprécier les différents processus impliqués.

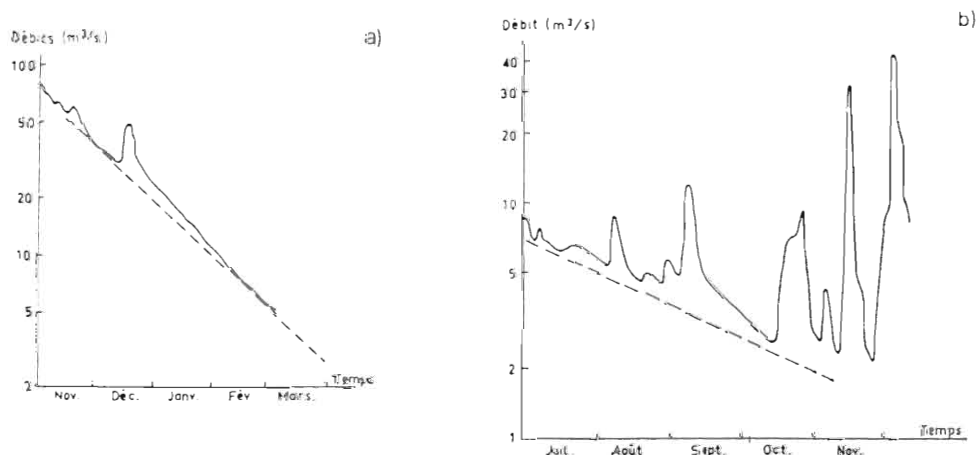


Figure 7 : Exemples de courbes de tarissement (tiré de [3])
a) non influencé
b) influencé

La **période d'apparition** et la **sévérité** des étiages sont étroitement liées au **régime hydrologique** du cours d'eau. Le critère habituellement utilisé pour la classification des régimes est la répartition annuelle des moyennes mensuelles des débits, calculées à partir d'une série d'observations aussi longue que possible.

Pour pouvoir facilement comparer les rivières entre elles et avoir une représentation uniforme, on utilise souvent les **coefficients mensuels de débits**, c'est-à-dire les rapports des moyennes mensuelles au **module inter-annuel** (moyenne inter-annuelle des débits moyens annuels). On obtient ainsi une répartition en pourcent des débits mensuels moyens au cours de l'année.

L'altitude moyenne obtenue à partir de la courbe hypsométrique du bassin versant, et l'amplitude de la variation mensuelle des débits permettent de préciser la classification des régimes hydrologiques. Cette amplitude est exprimée par le rapport entre les valeurs extrêmes des coefficients mensuels (minimum et maximum).

Ces deux notions, altitude et amplitude, sont d'ailleurs assez fortement liées comme le montre la figure 8.

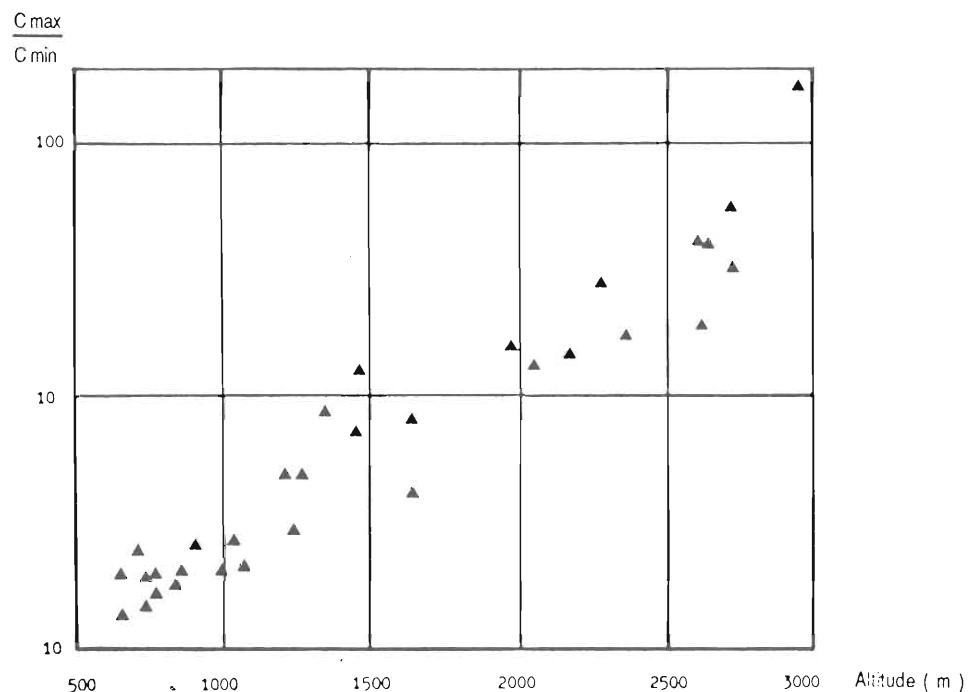


Figure 8 : Relation entre l'amplitude de la variation saisonnière des débits et l'altitude moyenne du bassin versant (tiré de [4])

En Suisse, il est possible de distinguer 6 régimes hydrologiques différents. Cette classification est basée sur les variations des coefficients mensuels de débits, l'amplitude entre les valeurs maximales et minimales de ces coefficients et l'altitude (cf. figure 9).

On distingue ainsi les régimes suivants :

1. Régimes glaciaires :
 - régime glaciaire normal [A]
 - régime glaciaire de transition [B]
2. Régime nival de transition [C]
3. Régime nivo-pluvial
 - supérieur [D]
 - inférieur [E]
4. Régime pluvio-nival [F]

Les caractéristiques essentielles des régimes hydriques précités sont présentées dans le tableau 1.

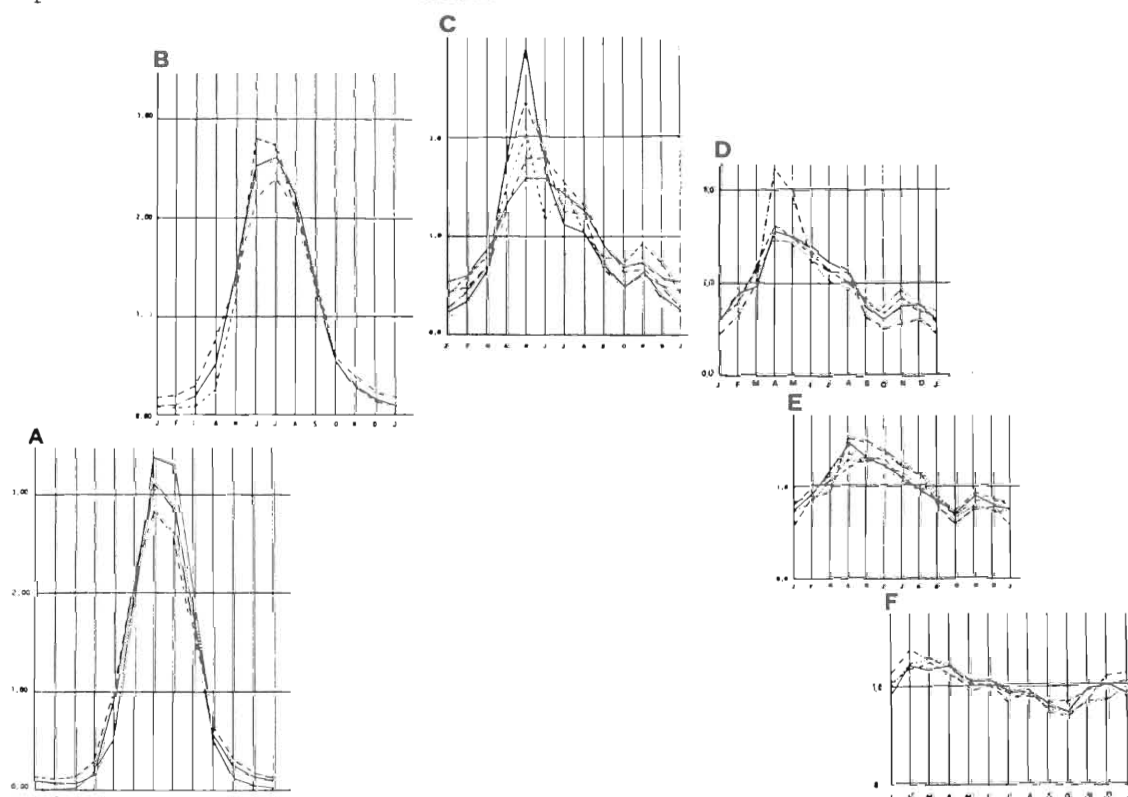


Figure 9 : Représentation des différents régimes hydrologiques de Suisse. Variation des coefficients mensuels de débits en fonction de la saison pour différents cours d'eau (tiré de [4])

Régime hydrique	Altitude [msm]	Amplitude [α]	Période d'occurrence des étiages
Glaciaire normal	> 2'500	> 25	hiver
Glaciaire transition	1'900 < < 2'600	12 < α < 35	hiver
Nival de transition	1'200 < < 1'900	3 < α < 13	hiver
Nivo-pluvial sup.	1'000 < < 1'200	2 < α < 5	hiver
Nivo-pluvial inf.	800 < < 1'000	1.8 < α < 2.5	début automne - fin été
Pluvio-Nival	600 < < 800	1.4 < α < 2.0	début automne - fin été
Pluvial	600 <		début automne - fin été

Tableau 1 : Caractéristiques essentielles des régimes hydrologiques

Nous pouvons constater que l'amplitude des coefficients mensuels de débit diminue avec l'altitude et que les périodes d'étiages passent de l'hiver (pour les régimes à haute altitude) jusqu'à la fin de l'été ou le début de l'automne pour le régime pluvio-nival. En effet, pour ce dernier, le froid hivernal ne se manifeste plus que par un palier en janvier et une légère hausse en février-mars. Pour les régimes intermédiaires (nivo-pluvial) les courbes présentent plusieurs maxima et minima. Il s'agit d'un effet combiné entre la fonte des neiges en altitude et le déficit pluviométrique pendant l'été.

Ces différences dans le comportement des régimes hydrologiques montrent que **la température** est un des facteurs prédominants pour les étiages. La température, par le biais de l'évaporation, détermine les pertes en eau des réservoirs souterrains et influence les étiages dans les régimes pluviaux. Pour le régime nival ou glaciaire, la température contribue à l'accumulation de la neige et à la restitution de l'eau (fonte des neiges).

Par ailleurs, la relation entre le régime hydrologique et l'altitude est satisfaisante; c'est ainsi que l'on a pu déterminer des fourchettes d'altitudes pour chacun de ces régimes. Il est donc possible de se faire une première idée du régime d'une rivière non jaugée d'après l'altitude moyenne du bassin versant.

En France une classification des régimes hydrologiques accompagnée d'une étude sur les étiages a permis d'associer un débit spécifique caractéristique moyen d'étiage à chacun des régimes (cf. tableau 2).

régime hydrologique	débit spécifique moyen d'étiage
Nival	6 à 15 l/s/km ²
Nival de transition	6 à 15 "
Nivo-pluvial pyrénéen	6 à 15 "
Nivo-pluvial	5 à 8 "
Glaciaire	3 à 6 "
Pluvio-Nival	2,5 à 4 "
Pluvial	1,3 à 3 "

Tableau 2 : Débits spécifiques caractéristiques moyens d'étiage (DCE) pour différents régimes hydrologiques français (tiré de [3])

Ces résultats semblent indiquer qu'il serait possible d'obtenir une estimation du débit caractéristique moyen d'étiage en fonction du régime hydrologique d'un cours d'eau par le biais de l'altitude.

Une analyse semblable effectuée sur des bassins versants suisses n'a pas pu toutefois fournir des résultats concluants comme le montre la figure 10.

Sur cette figure nous avons représenté, pour différents régimes hydrologiques, le débit caractéristique moyen d'étiage pour un temps de retour $T = 20$ ans exprimé en $l/s/km^2$ en fonction de l'altitude. Les débits provenant d'un même bassin versant sont reliés par des droites. Nous pouvons constater la mauvaise correspondance de ce débit avec l'altitude et par conséquent, avec le régime hydrologique correspondant. Pour les régimes de basse altitude, il est également impossible de définir une tendance entre ces deux types de paramètres. Pour les rivières de régime glaciaire, on constate cependant une décroissance du débit spécifique en fonction de l'altitude, la variation étant toutefois fort différente de cas en cas.

Ces résultats montrent clairement que malgré l'influence du régime hydrologique (cf. figure 9), la relation de ce dernier avec les étiages n'est pas directe.

La figure 11 illustre la période d'apparition du module mensuel minimum en fonction de l'altitude moyenne du bassin versant pour 43 bassins repères suisses.

Pour les régimes de haute altitude, le comportement est relativement stable. Par contre, en basse altitude (région du Plateau), la dispersion est importante et montre encore une fois que l'altitude moyenne n'est pas un paramètre déterminant pour qualifier les étiages. Il apparaît de façon évidente qu'à l'intérieur des régimes hydrologiques de basse altitude, les comportements des basses eaux peuvent varier de bassin en bassin de façon considérable.

La figure 12 montre la relation entre le débit caractéristique moyen d'étiage de temps de retour 20 ans ($l/s/km^2$) avec la surface du bassin versant. Que l'on groupe les valeurs des stations par région (cf. figure 12a) ou par régime hydrologique (cf. figure 12b) on ne réussit pas à obtenir des relations satisfaisantes.

Ainsi et malgré le fait que le régime hydrologique d'un cours d'eau puisse donner des indications qualitatives sur la date d'apparition et la sévérité des étiages, les résultats présentés jusqu'ici montrent que ce régime, par le biais de l'altitude, ne suffit pas pour fournir des estimations quantitatives des débits d'étiage. Il convient donc d'avoir recours à d'autres techniques d'estimation.

3.2 Méthodes d'estimation des étiages

3.2.1 Méthodes de prévision

Les méthodes de prévision des étiages se regroupent autour de l'étude des **courbes de tarissement** et de l'**analyse de corrélation** des variables explicatives. Cette dernière approche repose sur l'hypothèse qu'il est possible d'établir des relations robustes entre les étiages et les éléments du climat local (températures, hauteurs de pluie) qui influencent les variations des stocks en eau souterraine. sont supposés Citons à titre d'exemple, la formule Giandotti (1931) :

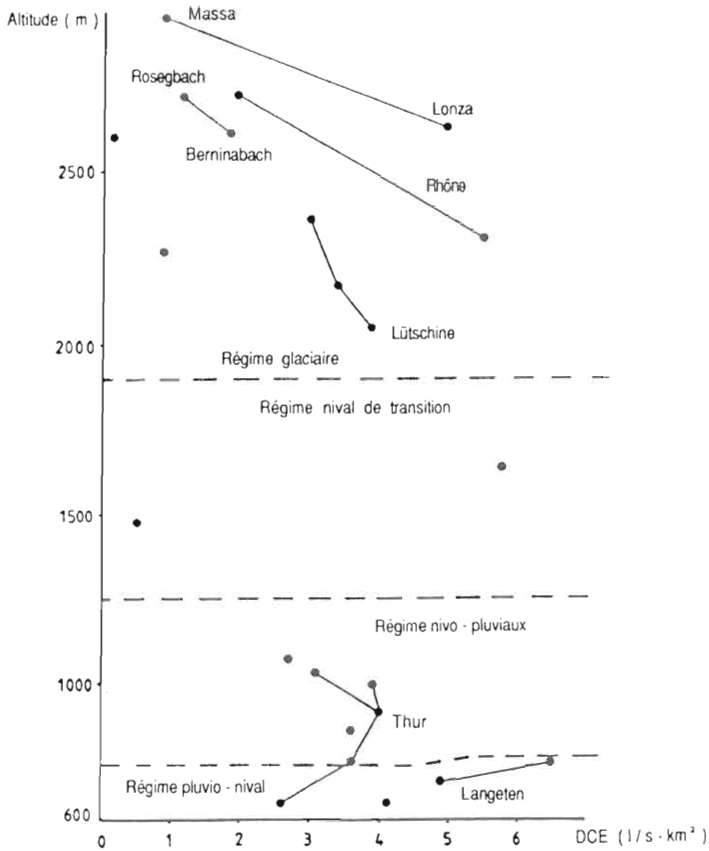


Figure 10: Variations du DCE
($l/s/km^2$) ($T=20$ ans)
avec l'altitude

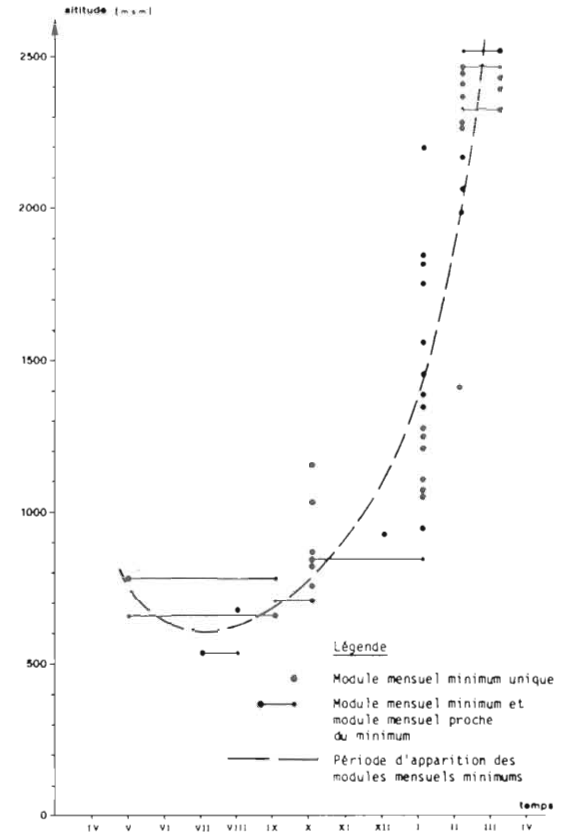


Figure 11: Période d'apparition
du module mensuel
minimum en fonction
de l'altitude moyenne

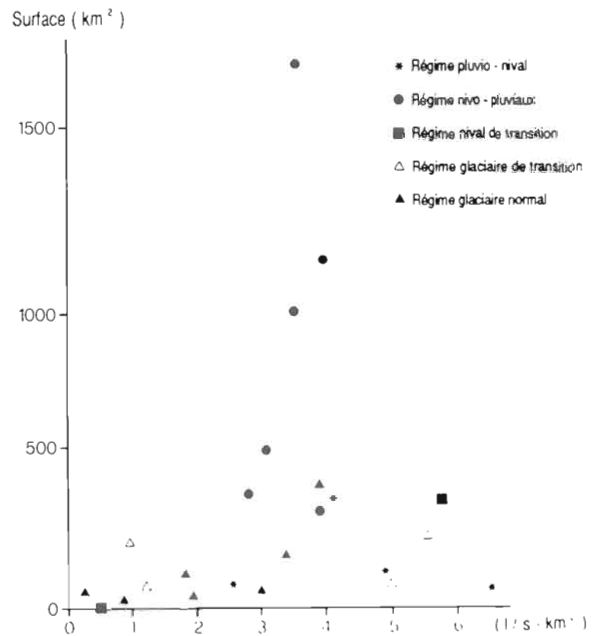
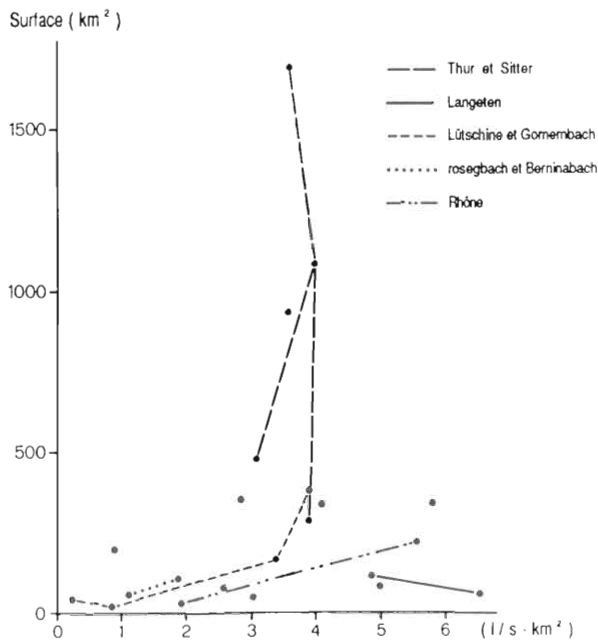


Figure 12 : Relation entre la surface et le débit caractéristique
moyen d'étiage de temps de retour 20 ans [$l/s/km^2$]
(tiré de [4])

$$Q = 220 + 2.7 P - 0.0027 P^2$$

avec Q débit mensuel minimal d'hiver du Pô à une station donnée
 [m3/s]
 P hauteur totale de pluie reçue dans le bassin versant des
 mois de septembre, octobre et novembre précédents
 [mm].

Ce type de formules empiriques, en plus de ne pouvoir être appliquées que dans les sites où elles ont été établies, présentent l'inconvénient de ne fournir de bons ajustements qu'avec des pas de temps importants (de l'ordre du mois au minimum).

Les études relatives à la variation du débit des sources ont servi de base à celles du **tarissement** des cours d'eau. Le tarissement simple, non influencé par les précipitations, peut être ainsi exprimé par les lois suivantes :

$$Q = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (\text{exponentielle simple})$$

ou encore :

$$Q = \frac{Q_0}{(1 + \beta t)^2} \quad (\text{hyperbolique simple})$$

avec Q = débit d'étiage au temps t
 Q₀ = débit initial (au début du tarissement)
 α, β = coefficients de tarissement

Dans le cas où le tarissement est complexe, il faudra faire appel à des lois composées du type :

$$Q = Q_0 (e^{-\alpha t^n})$$

avec n = deuxième coefficient de tarissement

ou encore :

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_{0i} (e^{-\alpha_i t})$$

avec m = nombre de segments dans la courbe de tarissement.

Il n'existe pas de critères spécifiques permettant le choix d'une loi au profit d'une autre. Leur applicabilité doit être vérifiée en fonction de leur aptitude à reproduire les courbes de tarissement observées.

Une fois le(s) coefficient(s) de tarissement déterminé(s), ces formules permettent de calculer le débit d'étiage (Q) en tarissement non influencé après un certain temps (t), à condition de connaître le débit initial (Q₀).

Le débit Q₀ est un indicateur du volume d'eau disponible dans le réservoir sol. Le coefficient de tarissement quant à lui, caractérise la vitesse de vidange. Les valeurs Q₀ et α varient en fonction du temps avec l'évapotranspiration et les pluies.

C'est pour cette raison que l'on est souvent amené à définir des époques caractéristiques qui approximativement représentent la climatologie locale. Une époque est donc définie comme une période dans l'année où les conditions climatiques sont uniformes et ne varient pas de façon significative d'une année à l'autre. (par exemple été et hiver).

Dans la méthode développée par Pereira [6] cette subdivision temporelle se fait uniquement sur une base calendaire avec deux époques mai-août et septembre-novembre. Les caractéristiques statistiques principales de l'ensemble des segments de tarissement qualifiés par les paramètres Q_0 et α sont alors regroupées dans les périodes précitées. Pour chaque époque on détermine, soit une courbe caractéristique de tarissement, soit une courbe enveloppe. La première traduit des conditions moyennes de tarissement tandis que la deuxième représente des conditions limites, c'est-à-dire une décrue idéale dans des conditions de la plus lente décharge. Cette méthode tente donc de caractériser l'état du réservoir sol par des couples Q_0, α (modèle exponentiel).

Le tableau ci-dessous fournit des valeurs (Q_0, α) des courbes caractéristiques de tarissement de quelques petits bassins de montagne. Ces résultats ont été obtenus à partir de segments de tarissement définis avec un pas de temps journalier.

Bassins surface (km ²)	Période Mai-Août		Période Septembre-Novembre	
	Q_0 (l/s)	α	Q_0 (l/s)	α
Vogelbach (1.55)	163,70 ± 34,56	0,6379 ± 0,0561	183,35 ± 53,07	1,0237 ± 0,1612
	59,15 ± 5,85	0,5133 ± 0,0477	66,46 ± 17,27	0,5132 ± 0,0403
	31,96 ± 5,66	0,2856 ± 0,0114	35,52 ± 3,69	0,2990 ± 0,0161
	20,78 ± 4,56	0,2022 ± 0,0153	29,48 ± 2,47	0,1960 ± 0,0055
	15,11 ± 5,70	0,0987 ± 0,0223	16,48 ± 3,43	0,1311 ± 0,0102
	9,14 ± 1,19	0,0522 ± 0,0070	9,44 ± 0,89	0,0634 ± 0,0053
			7,49 ± 0,91	0,0387 ± 0,0050
Lümpen (0.93)	143,70 ± 85,55	0,6697 ± 0,1125	188,27 ± 99,86	0,7706 ± 0,0735
	41,42 ± 10,91	0,3906 ± 0,0509	40,80 ± 25,16	0,3429 ± 0,0248
	16,63 ± 6,88	0,2908 ± 0,0225	19,83 ± 2,20	0,1488 ± 0,0142
	9,04	0,0755	6,96	0,0390
Frifang (1.08)	116,29 ± 23,60	0,4997 ± 0,0334	144,86 ± 39,43	0,7863 ± 0,0562
	58,29 ± 12,16	0,3594 ± 0,0164	38,88 ± 7,74	0,3323 ± 0,0264
	29,55 ± 4,33	0,1320 ± 0,0248	19,54 ± 2,87	0,1011 ± 0,0116
	18,16 ± 2,59	0,0751 ± 0,0103	11,75 ± 3,07	0,0316 ± 0,0043
Gämschbach (0.52)	92,76 ± 18,06	0,4820 ± 0,0418	83,97 ± 15,94	0,5809 ± 0,0789
	33,13 ± 6,04	0,2121 ± 0,0087	46,63 ± 8,92	0,2515 ± 0,0309
	29,47 ± 8,26	0,1452 ± 0,0145	29,16 ± 7,56	0,1670 ± 0,0147
	10,62 ± 4,50	0,0897 ± 0,0205	20,74 ± 3,01	0,0986 ± 0,0068
			13,23 ± 1,39	0,0513 ± 0,0053

Tableau 3 : Paramètres des courbes caractéristiques de tarissement et leurs intervalles de confiance à 80% (modèle exponentiel) (tiré de [6])

Dans une autre étude [7], les périodes représentatives sont définies en fonction de l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée avec la formule de Turc avec un pas de temps mensuel. En

outre, il s'agit d'une ETP lissée, car elle est calculée à partir d'une moyenne pondérée des valeurs des mois précédents.

$$\text{ETP lissée} = \frac{\text{ETP}_{i-4} + 3\text{ETP}_{i-3} + 5\text{ETP}_{i-2} + 7\text{ETP}_{i-1} + 9\text{ETP}_i}{25}$$

où i représente le mois en cours

Cette valeur mensuelle est supposée constante pendant tous les jours du mois où le calcul est effectué.

La correspondance avec des valeurs du débit initial Q_0 permet de distinguer des époques hydrologiques et climatologiques différentes comme le montre la figure 12 pour le bassin du Parimbot à Ecublens. Cette figure montre aussi les courbes caractéristiques de tarissement ainsi calculées à l'aide de la formule de décroissance exponentielle simple pour les 3 époques ainsi déterminées.

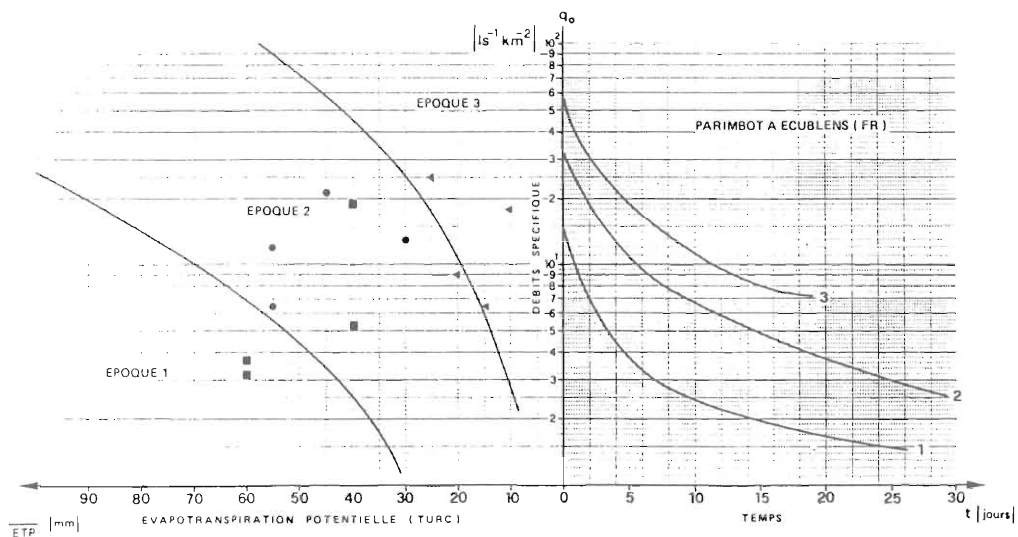


Figure 13 : Relation débit initial et évapo-transpiration potentielle avec séparation des époques (Parimbot à Ecublens) (tiré de [7]) et Courbes caractéristiques de tarissement du Parimbot à Ecublens (tiré de [7])

Ces études sur les courbes de tarissement fournissent une meilleure compréhension des conditions de vidange des réserves souterraines des bassins versants. Le problème de l'extrapolation des coefficients de tarissement à des bassins versants non jaugés reste cependant non résolu.

Notons encore que les prédictions des débits d'étiage décrites ci-dessus ne sont valables qu'en conditions de tarissement pur. Il faudra donc s'assurer qu'aucune pluie ne vienne alimenter la nappe pendant l'intervalle de prédiction. Finalement et vu le caractère prévisionnel de ces méthodes, ces dernières ne sont pas aptes, du moins directement, à estimer la valeur Q_{347} exigée par le projet de loi sur la protection des eaux.

3.2.2 Méthodes de détermination

Les méthodes de détermination fournissent des débits d'étiage avec une certaine probabilité de dépassement ou en fonction d'un temps de retour. Elles sont donc aptes, en principe, à calculer toutes valeurs remarquables, celle de Q347 en particulier. Nous avons déjà mentionné que le moyen le plus efficace pour les obtenir est la courbe des débits classés. Cette dernière ne peut être toutefois établie qu'à partir d'observations. Nous avons également indiqué (cf paragraphe 3.1) qu'il n'était pas possible de faire des analogies ni avec les régimes hydrologiques ni avec des relations débits spécifiques - surfaces. Les méthodes comparatives ou analogiques ne semblent donc pas adéquates à la détermination des débits d'étiage.

Par ailleurs et dans le cas des étiages, une méthodologie "directe" de détermination des débits caractéristiques, analogue à la méthode Bruschin-Falvay [8] développée pour les crues, ne semble à l'heure actuelle guère possible. En ce qui concerne les basses eaux, les caractéristiques de l'aquifère associées aux conditions de sa vidange sont déterminantes, et non la climatologie comme dans le cas des crues. L'utilisation de courbes fréquentielles régionales devient donc impossible, les caractéristiques de l'aquifère souterrain étant trop variables d'un bassin versant à un autre et les informations géologiques et hydrogéologiques trop souvent incomplètes.

La détermination de valeurs caractéristiques telles que Q347 semble donc passer inévitablement par la définition des courbes de débits classés. A défaut de valeurs observées, on pourrait parfaitement imaginer de travailler avec des débits calculés ou reconstitués par simulation continue des écoulements de la rivière. Il s'agit de calculer des débits à partir de séries chronologiques de pluies observées. On tient alors compte non seulement des périodes de tarissement pur mais aussi des éventuelles réalimentations des nappes par des précipitations. Par rapport aux méthodes de prévision, cette approche présente le grand avantage de se libérer du choix d'un débit initial Q_0 .

3.2.3 Simulation continue des écoulements de la rivière

Le but de la simulation continue est de reproduire des séries de débits à partir de longues chroniques de pluies observées. En Suisse, le réseau pluviométrique est relativement dense, en particulier pour les stations pluviométriques journalières (réseau ISM). Dans la plupart des cas, ces séries pluviométriques sont suffisamment longues. Les stations mesurant les précipitations à des pas de temps plus fins (10 minutes) sont cependant moins nombreuses. Toutefois, il est possible de générer des séries chronologiques de pluies avec des pas de temps plus fins à partir d'un pluviographe de référence dont les hauteurs précipitées sont corrigées sur une base journalière en fonction des enregistrements des pluviomètres voisins du secteur d'étude. Cette approche a été suivie avec succès dans l'étude hydrologique des écoulements des cours d'eau dans le secteur de la plaine de la Broye [9].

En général, les modèles de simulation continue traitent **simultanément** les crues et les étiages. En reproduisant de longues chroniques de débits, ces modèles permettent des études statistiques qui, en ce qui concerne les basses eaux, non

seulement fournissent la réponse aux exigences de la loi, mais aussi donnent la possibilité de répondre à des questions relatives à l'irrigation.

L'application de ce type de modèles est particulièrement adéquate dans les bassins versants pour lesquels on dispose d'une série courte mais continue de débits observés (entre 3 et 4 ans). Ces observations peuvent ainsi être utilisées pour un calage et une vérification du modèle adopté. Une fois les paramètres calés sur cette courte période, le modèle peut être utilisé pour générer des séries simulées de débits à partir des chroniques plus longues de pluies.

La figure 14 montre un plan de situation du bassin versant de l'Arbogne (affluent de la Broye) où nous avons appliqué la méthodologie décrite ci-dessus. Au Haras fédéral la surface totale du bassin versant est égale à 70 km². Les altitudes varient entre 814 et 432 msm. Le régime hydrologique se situe entre le régime pluvial et le pluvio-nival. L'occupation du sol est essentiellement rural avec des champs, des prairies, des pâturages et de la forêt dans sa partie amont. La pluviométrie annuelle moyenne varie entre 1'000 et 1'200 mm. Le sous-sol est constitué de molasse couverte principalement par des limons parfois sableux.

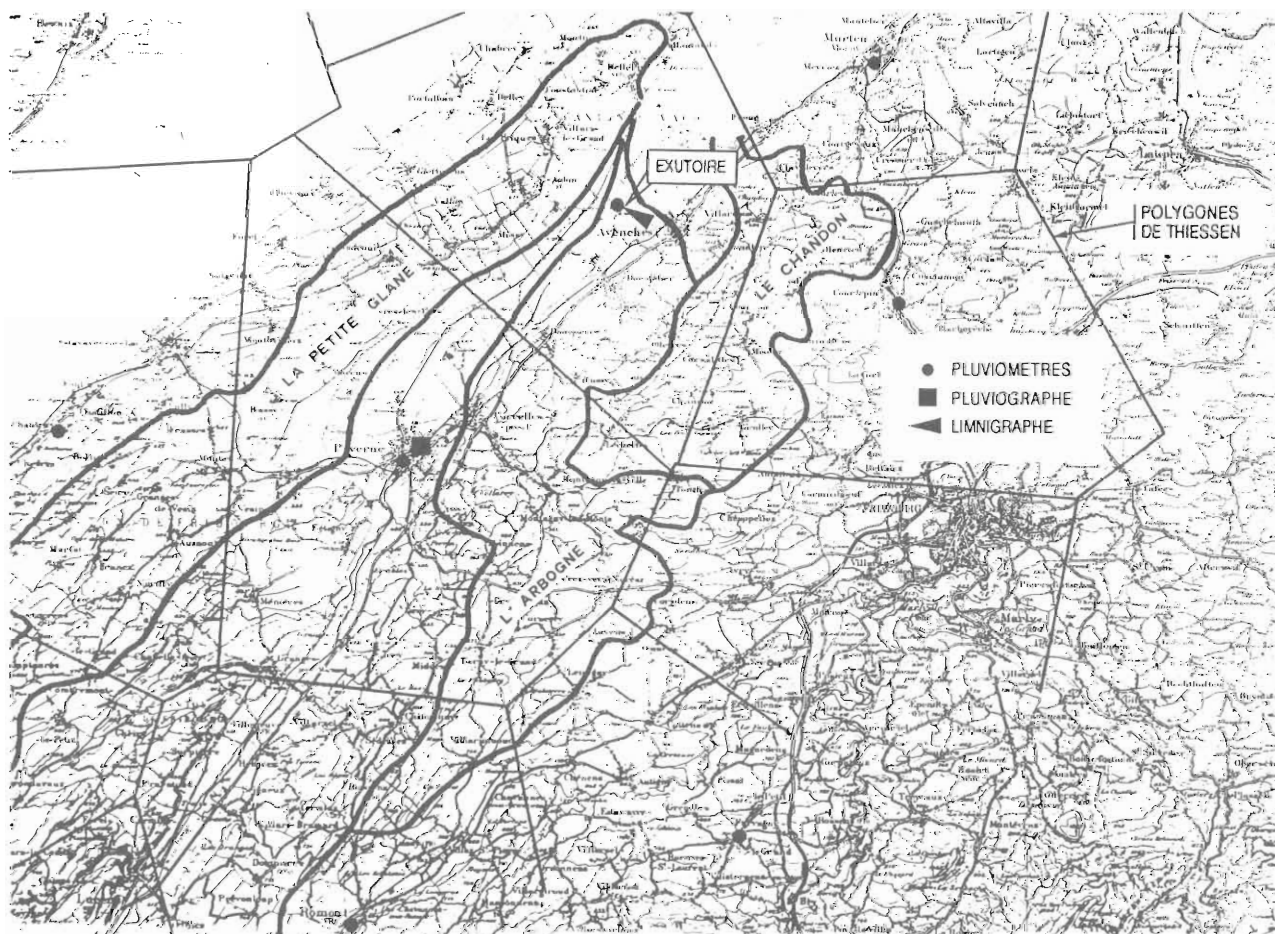


Figure 14 : Plan de situation du bassin versant de l'Arbogne.
Situation de l'exutoire et des appareils de mesure

Au Haras fédéral, nous disposons de mesures en continu des débits depuis juin 1984. Ces données ont été utilisées pour le calage et la vérification du modèle adopté. Une longue série chronologique de pluies (pas de temps horaire) a pu être reconstruite à cet

endroit en utilisant les données du pluviographe de Payerne corrigées sur une base journalière à partir des pluviomètres d'Avenches et de Romont. Cette série chronologique commence en mai 1978 (env. 10 ans).

Le modèle utilisé est QUALHYMO [10]. Il s'agit d'un modèle déterministe de simulation continue des crues et des étiages. Ce modèle a été développé au Canada. Il est maintenant en phase d'amélioration et de vérification à l'Institut de Génie rural de l'EPFL.

Le ruissellement de surface est calculé avec une version améliorée de l'équation SCS. Les conditions antérieures d'humidité sont définies par un indicateur du type IPA qui tient compte des précipitations antécédentes et de l'évaporation. La pluie nette est convoluée avec un hydrogramme unitaire du type Nash pour obtenir les débits de crue. La pluie infiltrée alimente un réservoir sol dont le taux de remplissage est aussi corrigé par l'évaporation. La vidange de ce réservoir est exprimée par une loi de tarissement exponentielle équivalente à celle décrite dans le paragraphe 3.2.1. Les débits souterrains sont additionnés aux débits de crue pour obtenir les débits totaux de la rivière.

Dans la phase de calage, les paramètres du modèle ont été fixés. En particulier nous avons déterminé des courbes caractéristiques moyennes d'étiage pour chaque mois. La figure 15 montre les résultats de la validation du modèle sur quelques mois de l'année 1987.

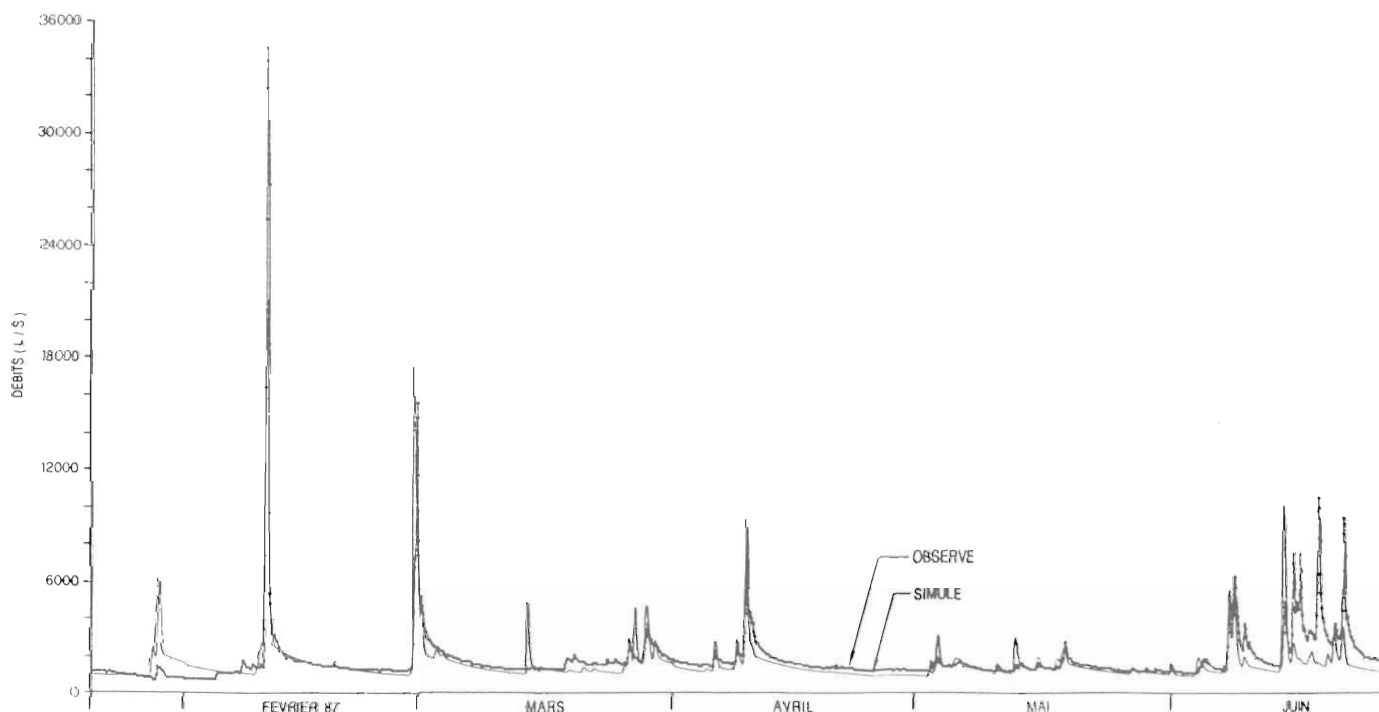


Figure 15 : Résultats de la validation du modèle QUALHYMO sur le bassin versant de l'Arbogne

Dans une deuxième phase, nous avons simulé la série chronologique des pluies corrigées (pas de temps = 1 heure) depuis mai 1978. L'analyse des débits moyens journaliers calculés nous permet ensuite de déterminer la courbe des débits classés de l'Arbogne au Haras fédéral (cf. figure 16). A titre de comparaison, nous avons aussi dessiné la courbe observée correspondant à l'année 1985.

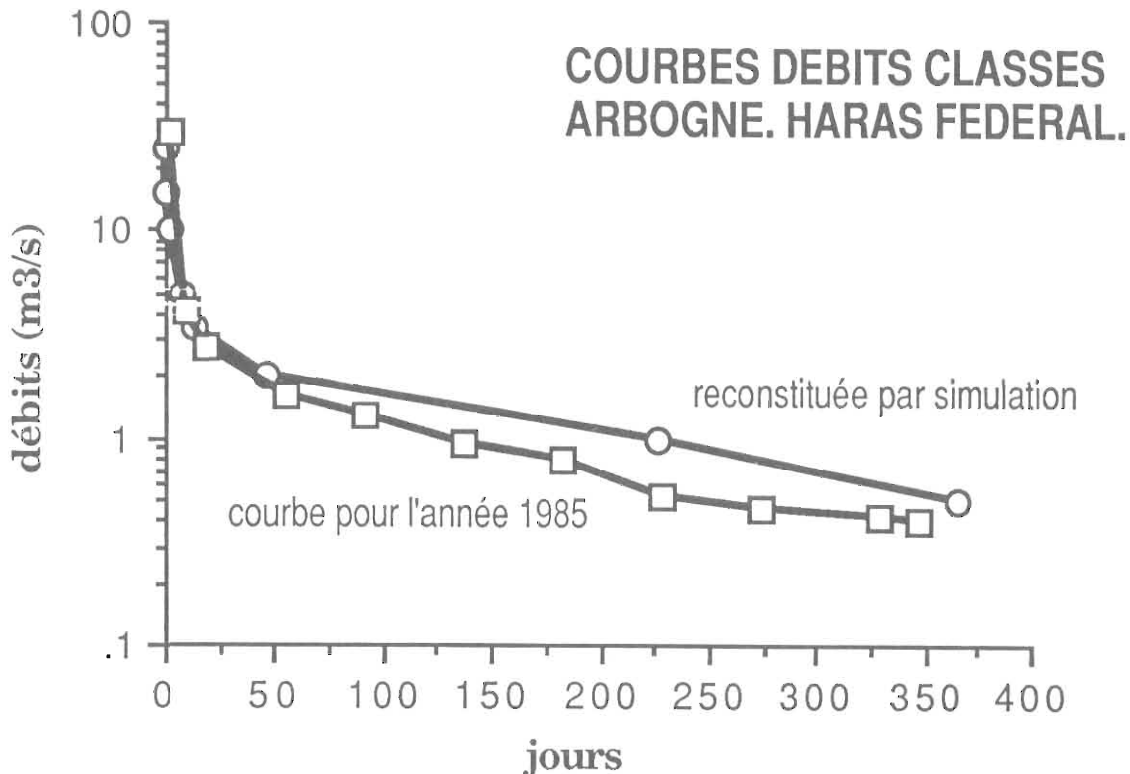


Figure 16 : Courbes des débits classés pour l'Arbogne au Haras Fédéral

La simulation continue permet donc de calculer des courbes de débits classés pour des bassins versants jaugés mais dont la trop courte période de mesure ne permet pas un calcul direct de la courbe en question et par conséquent de la valeur Q_{347} . Le problème essentiel qui reste à résoudre se situe au niveau de l'extrapolation des paramètres à des bassins versants non jaugés.

Une étude à l'échelle du Plateau suisse [11] a montré que la régionalisation des paramètres de l'hydrogramme unitaire de Nash était possible. Des résultats encourageants ont aussi été obtenus pour l'estimation des paramètres de l'équation SCS et le calcul de l'indice IPA [9]. Nous espérons ainsi que l'application d'un tel modèle continu aux autres bassins du secteur de la basse Broye nous permettent d'évaluer des valeurs caractéristiques nécessaires à l'appréciation des étiages de la région concernée.

Les travaux de Gloor et Walter [7] montrent des résultats intéressants dans cette direction. Le but de cette étude était en effet de reconstituer par simulation continue des séries chronologiques de débits mensuels d'étiages de petits bassins versants du Plateau suisse avec une surface inférieure à 100 km². Le modèle de simulation employé est un modèle déterministe de simulation continue des étiages uniquement, plus simple que celui décrit précédemment.

Les séries de pluies infiltrées constituent l'entrée principale de ce modèle. Celles-ci sont obtenues en soustrayant à la pluie totale, l'évapotranspiration et le ruissellement de surface. Les séries chronologiques des débits **mensuels** sont calculées par convolution des pluies infiltrées et d'une fonction de transfert qui schématise la réponse globale du réservoir souterrain. Dans le cas particulier de cette étude il s'agit d'un hydrogramme unitaire. Cette fonction de transfert peut être déterminée en exploitant les séries de débits mesurés de courte durée, à la suite d'une séparation des écoulements de base. Pour chaque bassin versant, l'identification de cette fonction de transfert se fait par déconvolution entre les pluies infiltrées et les débits d'étiage mesurés (après séparation) sur des durées au moins égales à 12 mois.

Les résultats de la déconvolution pour 12 bassins versants du Plateau suisse sont présentés dans la figure 17. Les hydrogrammes unitaires obtenus pour chaque bassin présentent en général des formes plurimodales. On constate cependant, qu'il existe toujours une première pointe dont la durée est relativement constante et égale à environ 4 mois. L'ordonnée maximale de la fonction de transfert est toujours atteinte le premier mois. Comme l'illustre la figure 17, celle-ci semble directement liée avec la surface du bassin. L'interprétation des autres pointes est délicate. On pourrait imaginer une explication en fonction de la géologie du bassin. L'existence de pics multiples pourrait sous-entendre la présence de réseaux d'écoulement différenciés au sens de l'aquifère. Ces aspects méritent cependant des recherches plus approfondies ou des analyses plus détaillées.

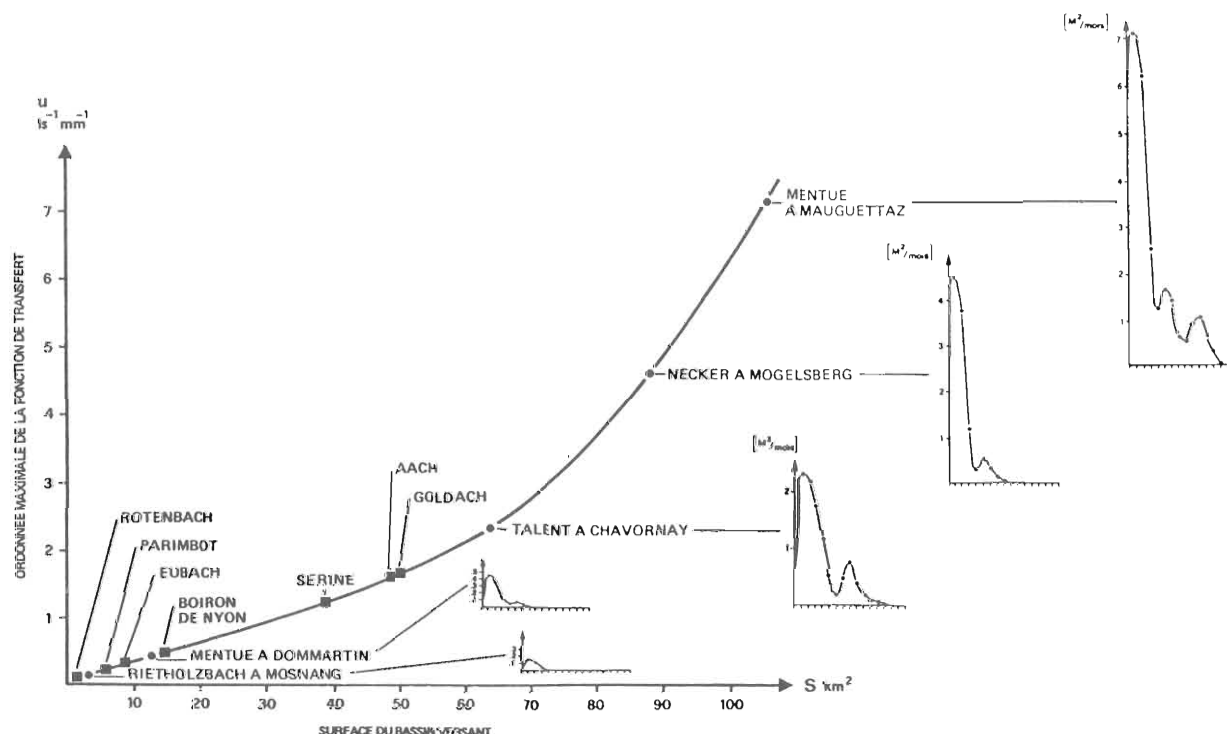


Figure 17: Relation entre l'ordonnée maximale de la fonction de transfert et la surface du bassin versant. Exemples de fonctions de transferts obtenues pour quelques bassins versants (tiré de [7])

4. CONCLUSIONS

La notion d'étiage est difficile à cerner. Les définitions possibles sont étroitement liées à l'utilisation de l'eau et aux objectifs de l'étude. Dans le cadre de cette communication nous avons volontairement prêter une attention particulière à la notion du débit minimum.

En effet, le projet de loi sur la protection des eaux oblige le maintien de débits minimums dans les cours d'eau de Suisse. Satisfaire les exigences de cette loi passe nécessairement par le calcul de la valeur Q347, à savoir le débit qui est dépassé 347 jours par année.

Le débit **Q347** ne peut être estimé de manière fiable qu'à partir d'une **courbe de débits classés**, établie à partir d'une série d'observations d'une durée d'au moins 10 années.

L'analyse des étiages au travers de celle du régime hydrologique des cours d'eau ne permet qu'une évaluation qualitative des basses eaux mais n'autorise en aucun cas le calcul de certaines valeurs caractéristiques des débits minimums.

Les méthodes de prévision, basées sur des lois de tarissement non influencé de la nappe, fournissent une bonne compréhension des relations nappes-rivières, mais ne peuvent pas être appliquées directement sur l'évaluation d'une valeur caractéristique de l'étiage, comme le Q347 par exemple.

Les méthodes de détermination permettent l'évaluation de certains débits de basses eaux en liaison avec leur probabilité d'occurrence (période de retour). Elle conduisent à l'évaluation de valeurs spécifiques, à condition de disposer d'une série suffisamment longue de débits observés, ce qui est rarement le cas.

La simulation continue permet d'exploiter les séries de débits mesurés de courte durée. Après avoir effectué les procédures de calage, il est possible de reconstruire une longue chronique de débits à partir de séries pluviométriques. Celles-ci sont en effet plus nombreuses. En outre, les modèles de simulation peuvent intégrer implicitement nos connaissances sur le tarissement des nappes souterraines.

Un des problèmes délicat qui reste à résoudre est celui de la connaissance des étiages dans des bassins non jaugés. Les techniques d'extrapolation sont difficiles, voire impossibles pour l'instant en fonction des précisions souhaitées. Toutefois, et en ce qui concerne les méthodes de simulation continues, celles-ci laissent entrevoir de bon espoir, grâce à la régionalisation plus aisée de certains paramètres explicatifs. Gageons que les études entreprises actuellement à l'Institut de Génie rural de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne permettront prochainement de trouver une réponse adéquate à cette question ardue et importante.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Message concernant l'initiative populaire pour "la sauvegarde de nos eaux" et la révision de la loi fédérale sur la protection des eaux, 29 avril 1987
- [2] Rapport final du groupe de travail inter-départemental EAUX DE RESTITUTION; présidée par M. le Conseiller national E. AKERET, Dr en droit; août 1982
- [3] **LARRAS, J.** (1972): Prévision et prédétermination des étiages et des crues; Ed. Eyrolles, Paris.
- [4] **SCHMIDT, F.** (1981): Détermination des débits d'étiage de cours d'eau représentatifs de quelques régimes hydrologiques; Travail de diplôme; IGR-EPFL, Lausanne, décembre.
- [5] **JATON, J.F.** (1980): Détermination des écoulements annuels et mensuels moyens d'un bassin versant; Public. IGR N° 155, EPFL N° 190; Tiré à part de "Ingénieurs et architectes suisses" N° 21 du 16.10.
- [6] **PEREIRA, L.** (1977): Etudes de tarissement sur des petits bassins versants de montagne; Thèse, Institut d'hydromécanique et d'aménagement des eaux, EPF-Zurich.
- [7] **GLOOR, R.; WALTER, M.** (1985): Estimation des débits d'étiage sur des cours d'eau sans mesures directes; Rapport final FNRS, EPFL-IGR, 85 p. + Annexes (25 p.).
- [8] **BRUSCHIN, J.; FALVEY, H.** (1974): Risques relatifs aux crues; EPFL-HYDREP. No.141, 18 p.
- [9] **CONSUEGRA, D.** (1974): Etude hydrologique des cours d'eau dans le secteur de la Broye moyenne et aventicienne; Rapport n° 4, EPFL-IGR 1989 (à paraître) (dans le cadre du mandat des cantons de Vaud et de Fribourg pour la définition d'un plan de gestion des eaux de surface).
- [10] **ROWNEY, A.C.; MAC RAE, C.R.; WISNER, P.E.** (1988): QUALHYMO. User manual Release 2.0; Department of Civil Engineering University of Ottawa, Canada.
- [11] **CONSUEGRA, D.** (1988): Détermination des caractéristiques d'un hydrogramme unitaire standard applicable aux bassins versants du Plateau suisse; Proceedings of the VIth IWRA World Congress on Water Resources, Volume 2; OTTAWA, Canada.
- [12] **MATTHEY, G.** (1966): Inventaire des cours d'eau du Canton de Vaud; Rapport de l'Inspection de la chasse et de la pêche, Lausanne. Actuellement : Conservation de la faune, 1025 St-Sulpice.

MESSUNG DES NIEDERWASSERS

Beat Sigrist

Landeshydrologie und -geologie, Sektion Hydrometrie, 3003 Bern

Zusammenfassung

Verschiedene Messeinbauten und -installationen, sowie Messgeräte und -methoden werden beschrieben und ihre Eignung begründet. Spezielle Niederwasserphänomene werden erläutert und es werden Vorschläge zu ihrer messtechnischen Erfassung gemacht.

Résumé

Plusieurs constructions et installations de mesure, ainsi que différents appareils et méthodes de mesure sont décrits. Des phénomènes très spécialement liés aux débits d'étiage sont ajoutés et on fait des propositions pour un bon fonctionnement des mesures de faibles débits.

1. Einleitung

Im Gegensatz zum Hochwasser ist das Niederwasser meist ein vor-aussehbarer und länger anhaltender Vorgang. Für den Messenden bedeutet dies eine wesentliche Erleichterung. Für temporäre Messkampagnen können die geeigneten Standorte gezielt ausgewählt werden. Bei festen Installationen kann der korrekte Betrieb der Messgeräte kontrolliert werden.

Ein natürlicher Wasserlauf steht in enger und ständiger Wechselwirkung mit seiner Umgebung: Beispielsweise durch Infiltration von Bachwasser ins Grundwasser und durch Exfiltration von Grundwasser ins Bachwasser wird die Wasserführung laufend verändert. Dem Standort der Niederwassermessung kommt deshalb grosse Bedeutung zu. In Trockenperioden zeigen kleine menschliche Eingriffe in den Wasserhaushalt oft grosse Auswirkungen auf die Wasserführung. Die Landwirtschaft pumpt Wasser ab zur Bewässerung der Felder, am Wochenende wird eine Messschwelle der Hydrometrie von Hobbywasserbauern zum Robinsonspielplatz umfunktioniert und dadurch die Limnigraphenaufzeichnung eventuell komplett verfälscht.

2. Einbauten und Installationen

Für die zuverlässige und genaue Bestimmung des Niederwassers ohne ständige Nacheichung der Pegel/Abfluss-Beziehung ist eine stabile Gerinneform Voraussetzung. Eine Sohlenfixierung, vorzugsweise mit einer erhöhten Ueberfallschwelle bietet die Möglichkeit, den Nullpunkt der Abflusskurve eindeutig festzulegen. Eventuell kann auch eine natürlich vorhandene Felsschwelle für diesen Zweck ausgenutzt werden. Es ist vorallem wichtig, dass keine Untersickerung dieses Querriegels stattfindet. Deshalb sind Blockschwellen für die Hydrometrie schlecht geeignet.

Für den Messbetrieb wird eine Flussschwelle möglichst zur Messschwelle ausgebildet: Je nach topographischen Voraussetzungen, Abflussregime, Geschiebetrieb und vorhandenem Budget bieten sich eine ganze Reihe von Bauformen und geeigneten Konstruktionsmaterialien.

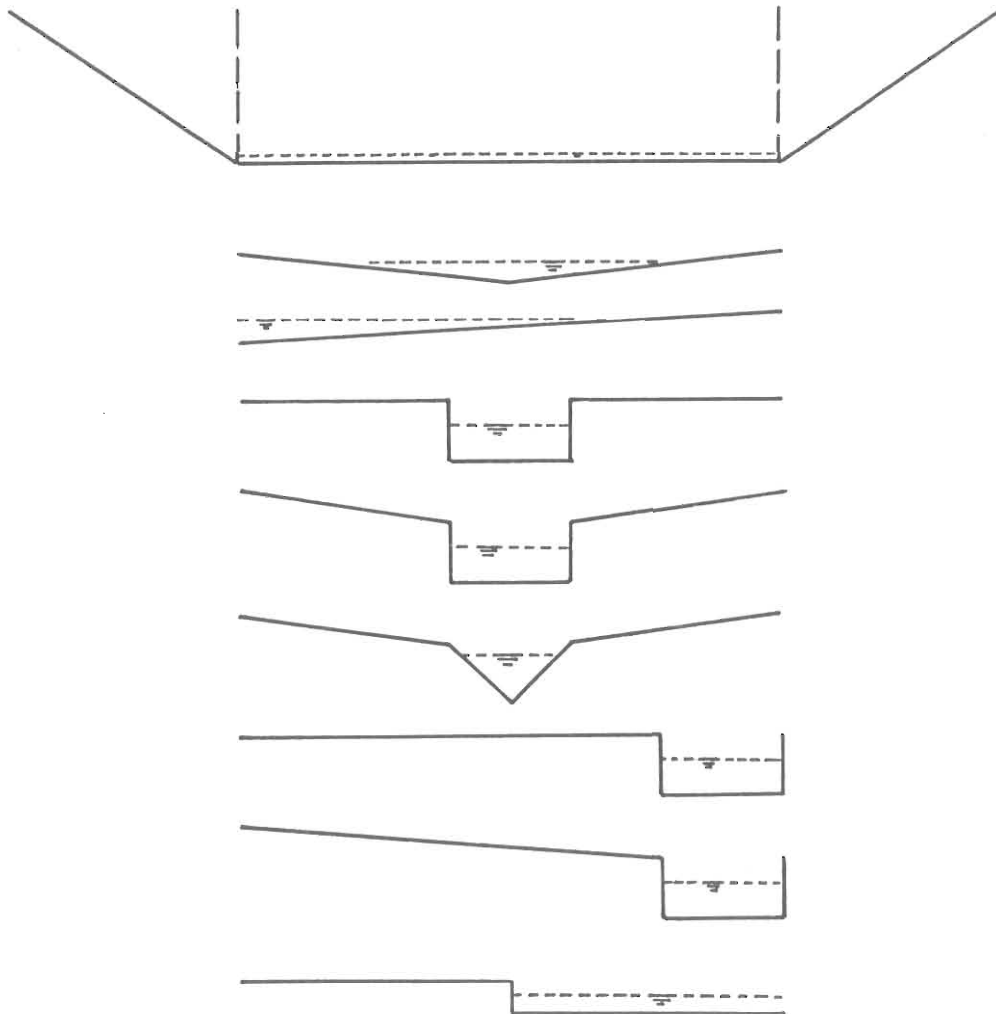


Bild 1 : Bauformen von Messschwellen oder Kanalprofilen mit unterschiedlich guter Differenzierung der Niederwasserabflüsse.

Bei Geschiebetrieb werden sich Ab- oder Auflandungen in der Anströmstrecke einstellen, die zu einer Veränderung der Fließgeschwindigkeiten führen. Wenn es die Topographie zulässt, ist der Einbau einer Vorschwelle vor die Messschwelle zu prüfen. Sie hat den Zweck, die Anströmbedingungen für die Messschwelle zu stabilisieren. Der optimale Abstand dieser Schwellen muss rechnerisch, durch Modellversuche oder direkte Feldversuche ermittelt werden.

Besonders bei breiten, flachen Flussläufen, wo meistens höchstens der Einbau einer Horizontalschwelle möglich ist, stellt sich bei der Herbst-Niederwasserführung das Problem des Algenbewuchses.

Durch Algen auf der Schwellenkronen wird der Wasserspiegel im Oberwasser bei gleichbleibendem Abfluss angehoben, einerseits infolge der Wasserverdrängung durch die Pflanzen, andererseits wegen der veränderten Rauigkeit der Oberfläche. Durch die Ausbildung von scharfkantigen Ueberfällen, eventuell mit einer Stahlkante, kann dieses Algenwachstum verhindert werden, oder zumindest lässt sich die massgebende Pegelschwelle leichter sauber halten.

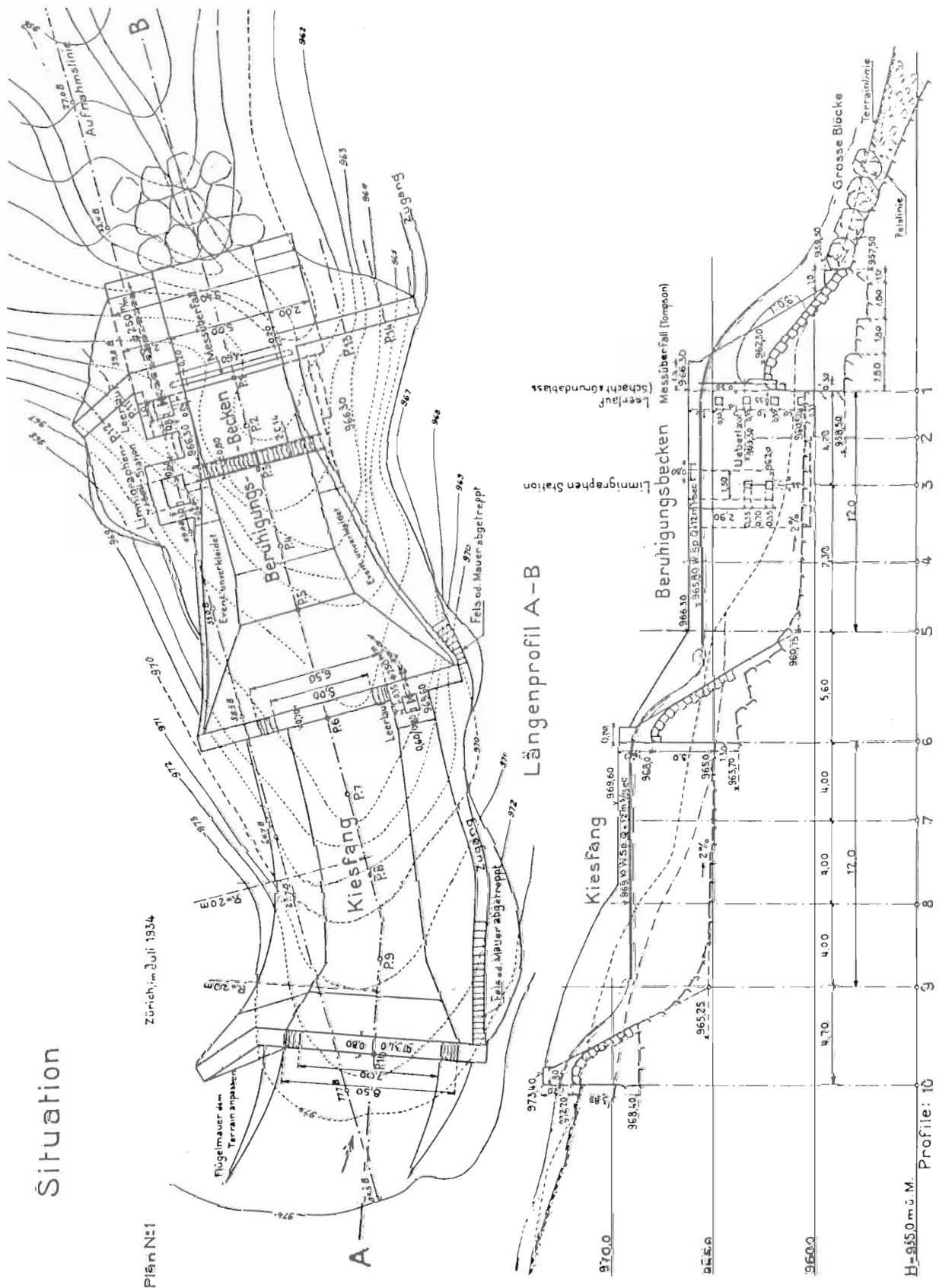
Bei kleineren Bächen, wenn das Sohlengefälle gross ist und hohe Anforderungen an die Messgenauigkeit gestellt werden, ist der Einbau eines Messgerinnes zu prüfen. Das Messgerinne endet vorteilhafterweise mit einem vollkommenen Ueberfall. Die Anströmung über eine Vorschwelle ist günstig, um Geschiebeablagerungen vor oder im Einlauf zum Messkanal zu verhindern. Der Ausbildung des Kanaleinlaufs soll erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Durch geeignete Formgebung muss vermieden werden, dass sich ablösende Wirbel bilden, die dann im Messkanal als laufende oder stehende Wellen die Registrierung des Wasserstandes verfälschen. Als Baumaterial für den Kanal können wahlweise Holz, Beton, Stahlblech oder besonders abriebfeste Materialien wie Schmelzbasalt verwendet werden. Von der Kosten- Nutzenseite her hat sich in unserem Messbetrieb eine verschweisste Stahlblechabdeckung von 10 - 25 mm Dicke bei starkem Geschiebetrieb gut bewährt.

Für die Niederwassermessung liegt der Vorteil von Messgerinnen gegenüber Messschwellen darin, dass die Abflussmessung mit dem Messflügel direkt im Messkanal präzise und einfach durchgeführt werden kann.

Die Profilformen sind vielfältig (s. Bild 1). Für sehr kleine Niederwasserabflüsse ist eine Lösung mit abgesetzter Niederwasserrinne zu empfehlen.

Für die genaue Messung kleiner und kleinster Wassermengen ist der Einbau eines Messwehres, einer Metallblende mit einem vorteilhafterweise dreieckförmigen, scharfkantigen Ausschnitt eine gute Lösung. Damit können Abflussverhältnisse geschaffen werden, die sehr stabil sind, sich modelltechnisch gut simulieren lassen, sich gut berechnen lassen und die durch volumetrische Direktmessung kleiner Abflüsse sehr gut kontrollierbar sind. Damit der Einbau möglich wird, ist relativ viel Höhendifferenz im Längsprofil erforderlich. Der Geschiebetrieb wird durch eine solche Einbaute verunmöglicht. Deshalb muss eventuell anfallendes Geschiebe in einem speziellen Geschiebesammler abgelagert werden können. Zudem erhöht sich die Messgenauigkeit, wenn die Anströmung des Dreiecküberfalls aus einem beruhigten Becken heraus erfolgt. Aus diesen Gründen ist der Einbau einer solchen Messstation in geschiebeführende Bäche aufwendig und wahrscheinlich nur zu vertreten, wenn gleichzeitig Studien über den Geschiebetrieb geführt werden sollen. Eine gewisse Anfälligkeit auf Geschwemmsel ist diesen Anlagen eigen und verlangt eine regelmässige Beobachtung, denn schon ein kleines festgeklemmtes Brett am Ueberfall "verändert" den Abfluss eventuell um ein Mehrfaches.

Für die Messung kleiner Wassermengen in kleinen Kanälen sind an sich Venturi-Einbauten gut geeignet. Da ihre gute Wirkung auf einen engen Abflussbereich limitiert ist, werden sie in der Hydrometrie eher sparsam, zum Beispiel zur Erhöhung der Messgenauigkeit in einer Niederwasserrinne, eingesetzt.



3. Messgeräte und -methoden

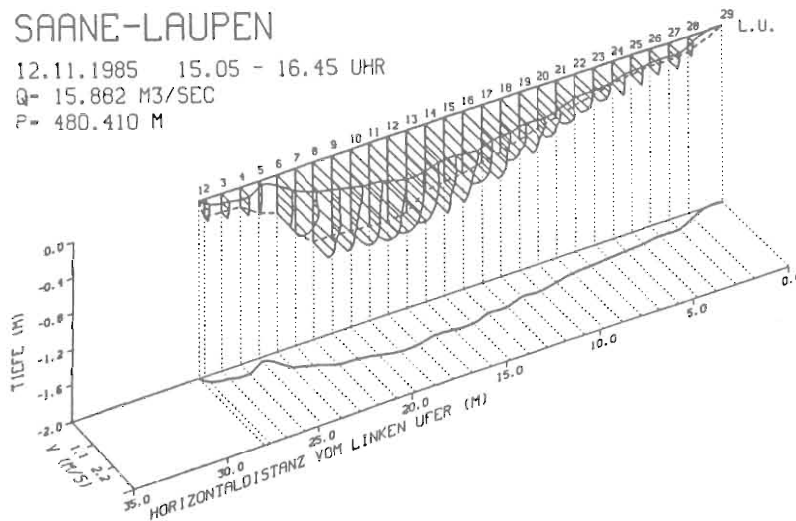
Für die hydrometrische Messung ist der Messflügel immer noch das meistverwendete Instrument. Auf die zu erwartende Tiefe und Fließgeschwindigkeit lässt er sich durch geeignete Wahl von Schaufeldurchmesser und -Steigung optimal einstellen. Für die Niederwassermessung ist besonders seine Anlaufgeschwindigkeit zu beachten. Wegen innerer Reibung arbeitet der Messflügel im Bereich knapp über der Anlaufgeschwindigkeit ungenau. Wichtig ist auch die Auswahl des Messprofils. Einerseits ist eine möglichst laminare Strömung erwünscht, andererseits ist eine minimale Tiefe erforderlich, der Flügel muss unbedingt immer ganz eingetaucht werden. In breiten und grobkiesigen Flüssen ist die genaue Aufnahme der Gerinnegeometrie oft mit mehr Fehlern behaftet als die Geschwindigkeitsmessung.

SAANE-LAUPEN

12.11.1985 15.05 - 16.45 UHR

Q= 15.882 M³/SEC

P= 480.410 M



SAANE-LAUPEN

12.6.1986 14.45 - 17.15 UHR

Q= 173.618 M³/SEC

P= 481.730 M

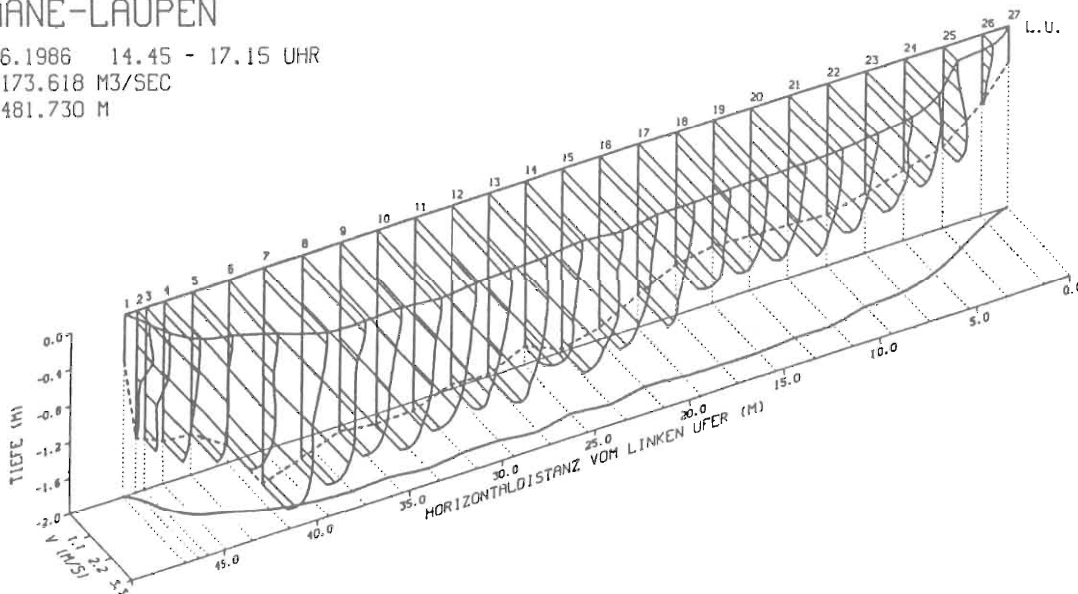


Bild 3: Geschwindigkeitsprofil der Saane bei Laupen für Q347 und für ein jährliches Hochwasser Q1

Die Niederwasserführung tritt oft im Sommer-Herbst auf, wo das Wasser warm ist und die Sonneneinstrahlung gross. Bei grossem Nährstoffangebot sind dies gute Voraussetzungen für ein starkes Algenwachstum. Für die Flügelmessung sind fadenförmige Algen besonders tückisch. Sie sind sehr fein, kaum sichtbar und haben die unangenehme Eigenschaft, sich um den Schaft des Flügels zu schlingen und damit die Drehung allmählich zu hemmen. Die Landeshydrologie und -geologie verwendet darum bei allen ihren Wassermessungen prinzipiell zwei verschiedene Flügel. Zeigt sich dann bei der Auswertung ein signifikanter Unterschied der gemessenen Geschwindigkeiten, ist dies ein starkes Indiz für eine solche "Bremsung".

In Fällen, wo der Messflügel nicht geeignet ist, wegen allzu turbulenter Strömung, bietet sich die Tracermessung an: Entweder als Verdünnungsmessung mit einem Fluoreszenztracer wie Amidorhodamin oder als Leitfähigkeitsmessung mit Kochsalz. Bei der Niederwassermessung sind die vollständige Durchmischung der Initiallösung mit dem Bachwasser und eventuell vorhandene Filtrationsgewinne oder -verluste besonders kritisch zu untersuchen. Zudem sind gerade bei Niederwasser die chemischen und biologischen Verunreinigungen des Bachwassers gross und die Tracer können dadurch eventuell abgebaut werden.

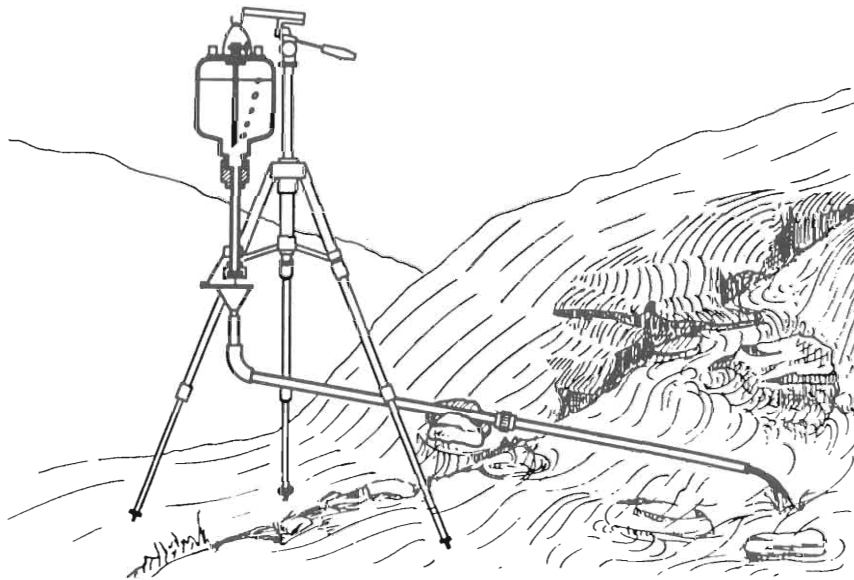


Bild 4: Mariott'sche Flasche. Aufbauschema für die Messung von kleinen und mittleren Abflüssen nach der Methode der konstanten Einspritzung.

Lassen sich geeignete bauliche Voraussetzungen schaffen, liefert die volumetrische Messung die genauesten Resultate. Zur Messung genügen ein ausreichend grosses, geeichtes Fass und eine Stoppuhr.

Häufig eingesetzt, vor allem wegen seiner einfachen Handhabung, wird auch der Tauchstab, ein nach der Drehmomentenwaage konstruiertes Messgerät. Er erlaubt eine rasche Abflussmessung in durchwatbaren Gewässern mit Fliessgeschwindigkeiten bis 1 m/sec. Wichtig ist eine genaue Messprofilaufnahme und es sollten nur gleichartige Profile miteinander verglichen werden.

Als Ergänzung zum Messflügel für Fliessgeschwindigkeiten im cm-Bereich gibt es magnetisch-induktive Strömungsmesser ohne bewegliche Teile. Kritisch sind hier die Reflexionen, die vor allem im Uferbereich auftreten.

Für Fälle mit veränderlichem Rückstau, wo die Beziehung zwischen Pegelstand und Abfluss nicht eindeutig ist, sondern erst durch die Kenntnis der momentanen Fliessgeschwindigkeit bestimmt werden kann, verwendet die Landeshydrologie und -geologie das Ultraschallmessverfahren. An gegenüberliegenden Ufern und seitlich versetzt werden Sender und Empfänger von Ultraschallimpulsen installiert. Aus den Laufzeitdifferenzen der Schallsignale kann die mittlere Geschwindigkeit in einer bestimmten Tiefe ermittelt werden. Dieses Verfahren arbeitet sehr genau auch für kleinste Geschwindigkeiten, ist aber recht aufwendig. Schwierigkeiten können sich bei Temperaturschichtung im Messprofil ergeben, da dann die Schallimpulse an den Schichtgrenzen reflektiert werden.

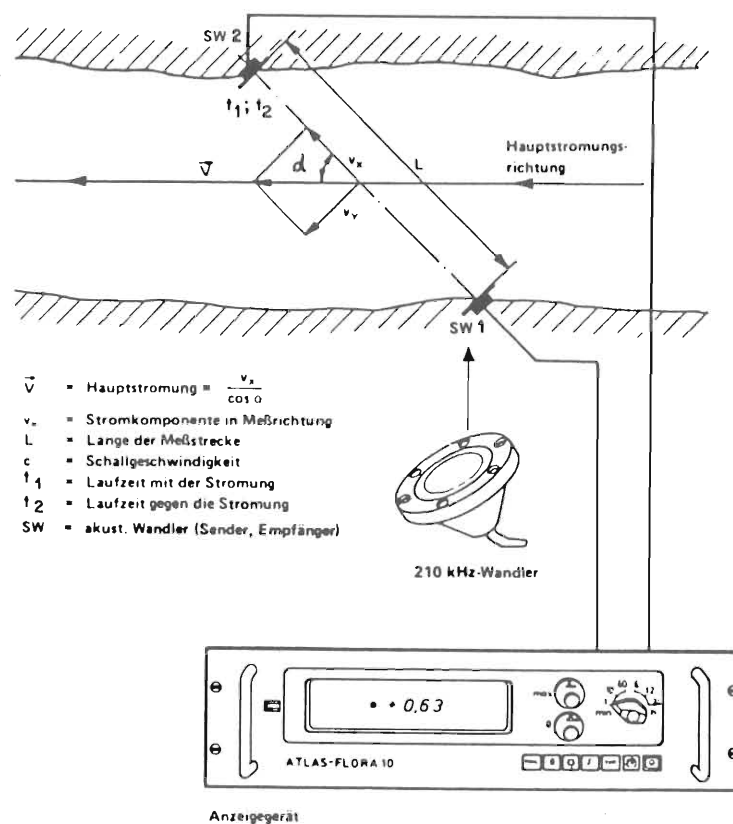


Bild 5: Prinzipskizze der akustischen Strömungsmessung (Ultraschall)

4. Besondere Probleme

Auf zwei Probleme, die sich besonders mit der Niederwassermessung ergeben, möchte ich zum Schluss noch hinweisen: Verkrautung im Sommer/Herbst und Vereisung im Winter.

Als Verkrautung wird in der Hydrometrie vereinfachend jeglicher Wuchs von Wasserpflanzen bezeichnet. Bei Algenwuchs ist der Störeffekt meist nicht enorm oder die Pflanzen lassen sich mit etwas Aufwand entfernen. Tritt aber beispielsweise flutender Hahnenfuss (*Ranunculus fluitans*) auf, müssen besondere Massnahmen ergriffen werden. Das gehäufte Auftreten dieser meterlangen Pflanzen führt durch Wasserverdrängung und Bremsung der Fliessgeschwindigkeit zu einer Anhebung des Wasserstandes von bis zu einem halben Meter und mehr. Da der Pflanzenwuchs stark von Nährstoffangebot, Lichteinfall und Temperaturen abhängt, sind die saisonalen Schwankungen gross. Als Beobachter am Flussufer lassen sich diese Veränderungen zwar meist erkennen, aber nicht quantifizieren. Als einziges probates Mittel hat sich eine verstärkte Abflussmess-tätigkeit erwiesen. Der durch die Pflanzen erzwungene Aufstau des Wasserspiegels kann so gemessen, chronologisch festgehalten und durch Korrektur am Pegelstand berücksichtigt werden. Eventuell muss vor jeder Messung das Messprofil sauber ausgemäht werden.

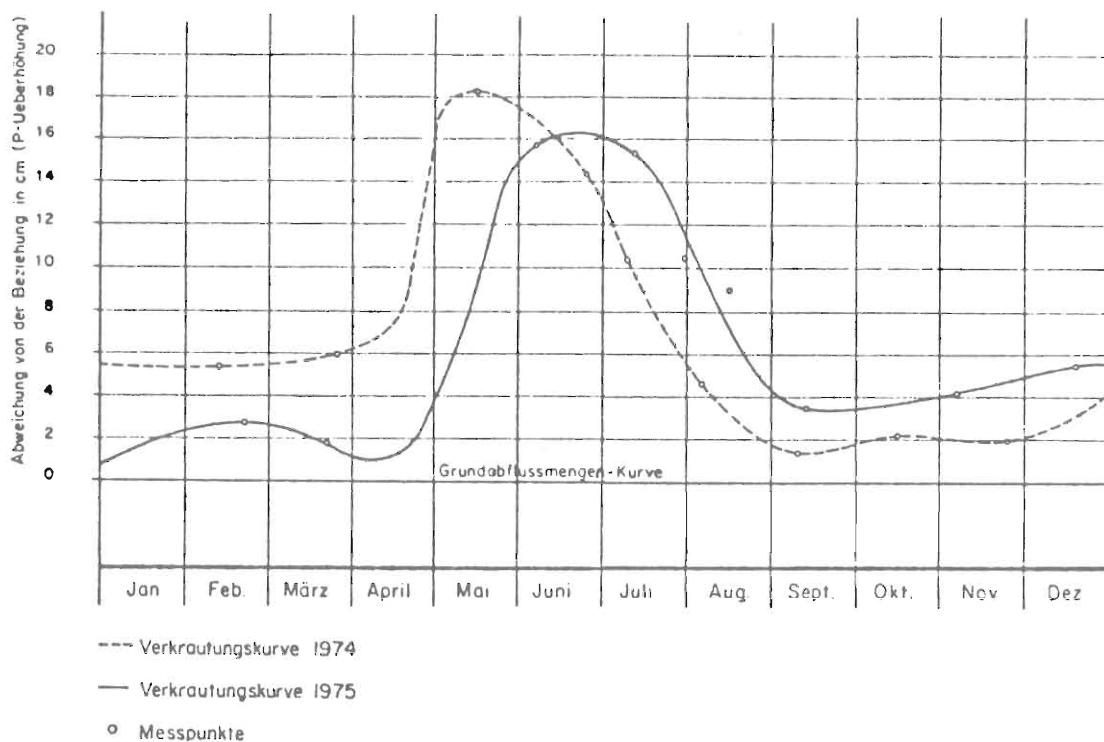


Bild 6: Messstation Rhein-Neuhausen. Verkrautungs-Korrekturkurven der Jahre 1974 und 1975. Die P-Ueberhöhungen gegenüber der P/Q-Beziehung ohne Verkrautung können als Pegelstandskorrekturwerte (in cm) für die einzelnen Tage herausgelesen werden.

Die Vereisung im Winter verunmöglicht oft eine genaue Pegelstands- und Abflussmessung. Glücklicherweise sind in diesen Kälteperioden die Gerinne- und Abflussänderungen klein. Mit einigen Stichproben in situ lässt sich der Abflussvorgang schon recht gut nachvollziehen. Für die Herrichtung von geeigneten Messprofilen muss aber zuweilen ein grosser Arbeitsaufwand getrieben werden. Es bilden sich Eisdecken an der Oberfläche, bei einem Ueberfall können Ober- und Unterwasser zusammenwachsen und auf der Sohle kann sich Grundeis formieren. Treibeis stört den Betrieb des Messflügels und führt eventuell zu Aufstauwirkungen.

Abschliessend lässt sich sagen, dass Niederwassermesskampagnen dank einigermaßen bekanntem Zeitpunkt und meist erheblicher Dauer der schwachen Abflüsse gut geplant und gezielt ausgeführt werden können. Bei geeigneter Wahl der Messgeräte oder geschickter Disposition der Installationen lassen sich auch gute Messresultate erzielen. Die Genauigkeit von Einzelmessungen und Abflusskurven ist aber, ausser bei speziellen Messwehren und -kanälen, nicht so hoch wie bei einer Mittelwasserführung.

Literaturverzeichnis

- Epper, J. (1907) Die Entwicklung der Hydrometrie in der Schweiz. Eidg. hydrometrisches Bureau: p. 41-74
- Landeshydrologie (1982) Handbuch für die Abflussmengenmessung. Landeshydrologie. EDMZ.
- André, H., et al. (1976) Hydrométrie Pratique des Cours d'Eau. Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France. Eyrolles.
- Spreafico, M. et al. (1985) Geschwindigkeitsverteilung in schweizerischen Fließgewässern. Grundlage für die Abflussbestimmung. Wasser, Energie, Luft 1985 1/2 p 3-9.
- Morgenschweis, G. (1985) Erste Erfahrung mit einer neu entwickelten magnetisch-induktiven Strömungs-sonde zur punkthaften Messung von Fließgeschwindigkeiten. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 29. Jahrgang Heft3 p. 69-76.
- Racle, Ch. (1984) Abflussermittlung in offenen Gerinnen mittels Ultraschallmessung. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen. 28. Jahrgang Heft 5/6 p. 159-163
- Racle, L. (1981) Unsicherheiten bei der Abflusssmessung mit Ultraschall und mit Messflügeln in offenen Gerinnen. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TK Berlin. 1982. 100.
- Hagmann, A. (1976) Erschwerte Bestimmung der Abflussmengen am Hochrhein zufolge Verkräutung. Wasser, Energie, Luft. 68. Jahrgang Heft 10 p. 243-245
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (1988) Niedrigwasserabflüsse in Baden-Württemberg. Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg. 1988 Teil 6.1
- WMO (1970) Symposium on hydrometry Koblenz. IAHS-Unesco-WMO Publication No 99 IAHS. div.
- Engler, A. (1919) Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. Schweiz. Zentralanstalt für das forstliche Versuchswesen. XII. Band p. 56-78

- Burger, A. (1955) Der Wasserhaushalt in der Valle di Melera in den Jahren 1944 bis 1954. Mitteilungen der Schweiz. Anstalt für das forstliche Versuchswesen. XXXI. Band, Heft 2 p. 529-541
- Züllig, H. (1977) Venturikanäle und messtechnische Anforderungen für genaue Abwassermessungen. Wasser, Energie, Luft. 69. Jahrgang. Heft 5. p. 111-115

SCHÄTZUNG DES NIEDERWASSERS

Ch. Leibundgut

Institut für Physische Geographie, Lehrstuhl für Hydrologie,
Albert-Ludwigs-Universität, Werderring 4, D-7800 Freiburg

und U. Schröder

Geographisches Institut Universität Bern, Abteilung
Hydrologie, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern

Zusammenfassung

Für praktische Zwecke und zur Regionalisierung der Niedrigwasserabflüsse müssen diese für ungemessene Gebiete häufig abgeschätzt werden. Das Niedrigwasser weist eine Charakteristik auf, die eine Abschätzung sehr schwierig gestaltet. Die relevanten Faktoren und ihre Wirkungsweise sind nur ungenügend bekannt. Mit der in der Schweiz heute offiziell verwendeten Kennzahl Q_{347} kann das Niedrigwassergeschehen nur teilweise charakterisiert werden. Die bisher angewendeten mathematischen und statistischen Auswerteverfahren müssen weiterentwickelt werden. Niedrigwasser sind oft durch anthropogene Eingriffe beeinflusst (Zu- und Ableitungen, Bewässerung). In den drei schweizerischen Testgebieten Mentue, Gürbe und Murg liegen die Abweichungen der Tagesmittel in der Standardperiode 1976-1985 zwischen 4-41 %.

Aufgrund erster Analysen in drei Testgebieten im Schweizerischen Mittelland, kann festgestellt werden, dass die einzelnen Einzugsgebiete eine hohe individuelle Prägung aufweisen, die eine gleichartige Behandlung erschweren. Die generelle Übertragung von Werten in Bereiche des Niedrigwassers ist mindestens vorläufig noch nicht möglich.

Résumé

L'estimation des débits d'étiage est souvent nécessaire pour des applications pratiques et pour les techniques de la régionalisation. Elle est assez difficile parce que les débits d'étiage sont d'une nature complexe. Les paramètres relevant sont insuffisamment connus. Les débits d'étiages ne peuvent être caractérisés de manière satisfaisante à l'aide de la valeur officielle du débit " Q_{347} ". Il est nécessaire de développer les techniques mathématiques et statistiques appliquées jusqu'à présent. Les débits d'étiage sont souvent affectés par des influences anthropogènes (irrigation etc.). Les différences entre les débits naturels et les débits affectés dans trois bassins versants observés se montent à 4-41 %. Selon les analyses préliminaires les bassins versants sont d'une grande individualité. Il est impossible de les traiter de façon générale.

1. Einleitung

Niedrigwasser galten in der Hydrologie und Wasserwirtschaft bisher als recht gut abschätzbar. Dies umsomehr, als dass sie auch gemessen werden können, während Hochwasserabflüsse aus rein technischen Gründen oft nicht gemessen werden können. Es wäre deshalb naheliegend, das Niedrigwasser zu messen, wo Daten über minimale Abflüsse benötigt werden. In unserer schnelllebigen Zeit, in der die Daten für einen sachlichen oder politischen Entscheid immer schon gestern bereitstehen sollten, fehlt meistens die Zeit für Messungen, dies besonders in kleinen Einzugsgebieten. Nach einer unveröffentlichten Studie der Landeshydrologie und Geologie (LHG) sind im schweizerischen Mittelland Messdauern von immerhin zwei bis drei Jahren nötig um gute Resultate zu erhalten. Obwohl die Schweiz im weltweiten Vergleich eine sehr hochauflösende Datenlage besitzt, sind im Niedrigwasserbereich zur Lösung der vorliegenden Fragen nur ungenügende Daten vorhanden. Dies vor allem in kleinen Einzugsgebieten unter 200 km².

Für praktische Zwecke einerseits und in Zusammenhang mit Regionalisierungsfragen andererseits, müssen deshalb Niedrigwasserabflüsse häufig abgeschätzt werden. Die Abschätzung kann mit Hilfe statistischer (stochastischer) oder deterministischer Ansätze vorgenommen werden.

2. Zum Charakter des Niedrigwassers

Das Niedrigwasser folgt offenbar komplizierten eigenen Entstehungsmechanismen (Prozessen) die nicht jenen des Mittel- oder Hochwassers entsprechen. Kausale methodische Analogieschlüsse zu Hoch- und Mittelwasser-Untersuchungen können deshalb kaum durchgeführt werden, da der statistische Wert des Mittelwassers als solcher wenig über die Niedrigwasser-Abflusscharakteristik aussagt. In der Mittelwertshydrologie wird/wurde meist mit der zeitlichen Auflösung Jahr bis Monat gerechnet. Dabei werden die für die Niedrigwasserabschätzung entscheidend wichtigen kurzzeitigen Schwankungen im Tagesbereich ausgemittelt. Wertvolle Grundlagen-Studien, wie jene über die Abflussregime der Schweiz, die von langjährigen mittleren Abflüssen ausgehen, können daher nur bedingt zur Abschätzung des Niedrigwassers benutzt werden. Auch regionale Übertragungen auf dieser Basis sind nur sehr eingeschränkt möglich.

So kann in Bezug auf die Niedrigwasseruntersuchung nur bedingt mit Monatsmittelwerten gerechnet werden, da unter Umständen wichtige Informationen in Bezug auf das Niedrigwasser verloren gehen. Selbst bei Tagesmittelwerten kann dieser Effekt noch auftreten.

Methodische Differenzen bestehen auch zur Hochwasser-Hydrologie. Bei der Berechnung des Hochwassers ist die Eingangsgrösse (Niederschlag) sowohl zeitlich als auch betragsmässig bekannt. Eine Übertragungsfunktion welche Retention und Translation des Einzugsgebietes, sowie die "momentane Einzugsgebietscharakteristik" berücksichtigt, liefert uns die gesuchte Abflussganglinie. Die gültigen Zeitspannen sind sehr kurz.

Im Gegensatz dazu sind beim Niedrigwasser die **Eingangsgrössen** bzw. die **Eingangsprozesse** ebenso die Translation und die Retentionsvorgänge, sowie deren zeitliche Gültigkeit nur wenig bekannt. Lediglich der Abfluss ist meßbar und bekannt. Die Genauigkeit der Abflussdaten ist aus messtechnischen Gründen oft ungenügend (SCHMIDT et al., 1983).

Niedrigwasserabflüsse sind häufig durch lang- oder kurzfristige **anthropogene Eingriffe** beeinflusst. Deshalb sollten Niedrigwasserdaten ohne genaue Prüfung auf diese Einflüsse nicht verwendet werden. Ist ein solcher Einfluss feststellbar oder auch nur wahrscheinlich, muss die Rekonstruktion der natürlichen Niedrigwasserabflüsse als Ausgangspunkt für vertiefte Analysen vorgenommen werden.

Die grosse **räumliche Variabilität** impliziert, dass Referenzstationen nur sehr bedingt als Ausgangspunkte für eine Abschätzung in nicht gemessenen Gebieten herangezogen werden können. Benachbarte, selbst am gleichen Gerinne liegende Stationen korrelieren häufig nicht. Dies sowohl in Dauer, Häufigkeit und Betrag. Die Ursachen liegen vor allem in Inhomogenitäten der Niederschlagsverteilung und der Geologie.

Die **Fläche** hat dabei einen relativ grossen Einfluss, weil sowohl die Inhomogenitäten des Niederschlages als auch die der Speicherverhältnisse mit zunehmender Fläche ansteigen. Das Niedrigwasser weist damit gesamthaft eine Charakteristik auf, die eine Abschätzung schwierig macht.

In der Schweiz wird das Niedrigwasser heute offiziell über einen Wert, nämlich den sogenannten Q_{347} , charakterisiert. Darunter verstehen wir den abszissengemittelten Abflusswert, der an 347 Tagen/Jahr erreicht oder überschritten wird. Für eine treffliche Charakterisierung des Niedrigwassers reicht dieser **Einzelwert** jedoch nicht aus, weil

- er nur 5% der Stichprobe umfasst,
 - der relative Fehler der Messung gross ist,
 - die Dauerkurve, aus der das Q_{347} ermittelt wird, keine kontinuierliche (stetige) und damit an jeder Stelle differenzierbare Funktion ist. Vielmehr entspricht der Kurvenverlauf einer Treppenfunktion (Abb. 1).
- Deshalb wirken sich Datenfehler auf die Festlegung des Q_{347} -Wertes bei der Treppenfunktion stärker aus. So beträgt die Spanne des Q_{347} -Wertes für die Station Mentue-Dommartin 3.6 - 6.9%, anstelle des eindeutig definierten 5%-Wertes

(ASCHWANDEN & SCHÄDLER, 1988). Es muss empfohlen werden, von einer Ober- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit im Sinne einer Genauigkeitsangabe zu sprechen.

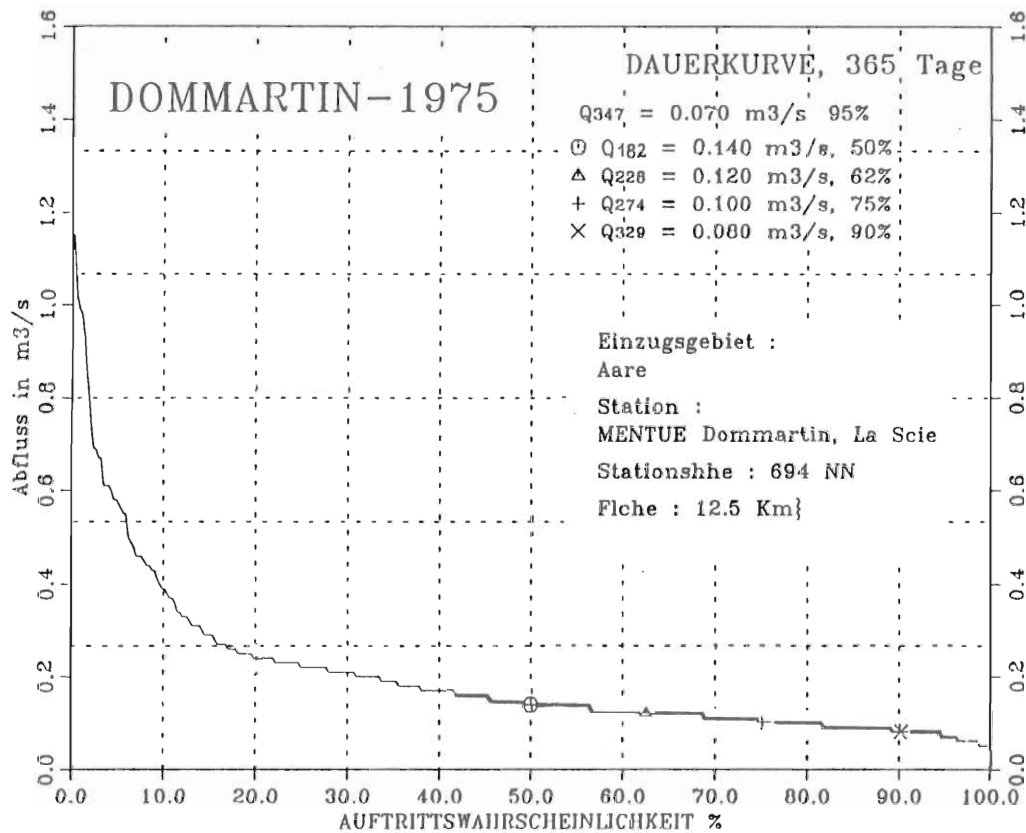


Abb. 1: Der Kurvenverlauf der Dauerkurve ist besonders bei den niedrigen Abflusswerten treppenartig gestuft.

Um die hydrologischen Eigentümlichkeiten eines Einzugsgebietes in Bezug auf Niedrigwasser zu kennzeichnen, oder mit der erforderlichen Genauigkeit beschreiben zu können, ist mehr als nur ein einziger Wert (Q_{347}) nötig. Es müssen weitere Kennwerte wie 10%-, 25%- Quantile, Schwankungskoeffizienten, Saisonalität, $NQ(x)$ und weitere Werte mitberücksichtigt werden.

3. Ziele und Verfahren zur Abschätzung des Niedrigwassers

Mit den bisherigen Ausführungen zum Niedrigwasser lassen sich die allgemeinen Ziele für die Niedrigwasserabschätzung umreißen. Im wesentlichen lassen sich zwei Verfahrensweisen unterscheiden.

Ermittlung statistischer Kenngrößen (DVWK, 1988):

- Ermittlung des mittleren Abflusses für eine festgelegte Zahl aufeinanderfolgender Tage ($NM \times Q$)
- Ermittlung der Dauer der Unterschreitung (x) eines festgelegten Abfluss-Schwellenwertes (Q_s)
- Ermittlung eines Schwellenwertes für eine bestimmte Unterschreitungsdauer (Bsp. Q_{347})
- Ermittlung der Häufigkeit der Unterschreitung (wie oft wird der Schwellenwert unterschritten)
- Ermittlung des Abfluss-Defizits (Vol) zwischen Niedrigwasserabfluss und Schwellenwert

Mathematische und graphische Verfahren:

- Basisabflussberechnung nach Wundt-Kille (KILLE, 1971)
- Rezessionsanalyse
Trockenwetterauslauflinie, graphische Auswertung nach NATERMANN (1951), LEIBUNDGUT (1982)

Trockenwetterauslauflinie, mathematische Beschreibung nach Boussinesq und Maillet, einfacher linearer exponentieller Ansatz, Grundform $Q_t = Q_0 * e^{-a \cdot t}$.

Das mathematische Verfahren erfuhr eine Erweiterung durch BARNES (1939) und später durch PEREIRA und KELLER (1982). Eine Zusammenstellung der verschiedenen Verfahren zur Rezessionsanalyse finden sich in DEMUTH (1989). In der prozessorientierten IGR-Studie werden auf der Grundlage von MARSILLY (1978) Eingangsgrösse und Übertragungsfunktionen berücksichtigt (GLOOR und WALTER, 1986).

Die oben beschriebene Zielsetzungen sind in der Projektbeschreibung: "Abschätzung der Niedrigwasserabflüsse im schweizerischen Mittelland" miteinbezogen worden. ASCHWANDEN und SCHÄDLER (1988) haben in ihrer Studie zur Bestimmung der Restwassermenge in der Schweiz gezeigt, dass mit Hilfe regressionsanalytischer Verfahren, die Niedrigwassermengen hinreichend genau bestimmt werden können. Die **Regressionsverfahren** eignen sich allerdings nur für Einzugsgebiete mit einer mittleren Höhe von > 1550 m ü.M.. Deshalb sollen für die übrigen Teile der Schweiz (Mittelland, Voralpen und Tessin) anhand von drei Testgebieten geeignete Verfahren gefunden werden.

Im Vordergrund stehen zur Zeit Analysen der Ganglinien und der Speicherausläufe (Rezessionsanalyse). Damit soll eine verbesserte Kenntnis der Entstehungsmechanismen des Niedrigwassers, der Translations- und Retentionsglieder, welche zum Niedrigwasserabfluss führen, erreicht werden. Die prozessbeeinflussenden Faktoren sollen anschliessend über **multiple Regressionsansätze** bestimmt werden. Mit der Kenntnis der Prozesse und der wirkenden Einflüsse scheint damit eine Abschätzung und Regionalisierung möglich.

Unsere Vorstellungen gehen von einem **Dreikomponenten-Modell** mit einem Boden-, einem bodennahen Untergrund- und einem Untergrundspeicher aus (Abb. 2).

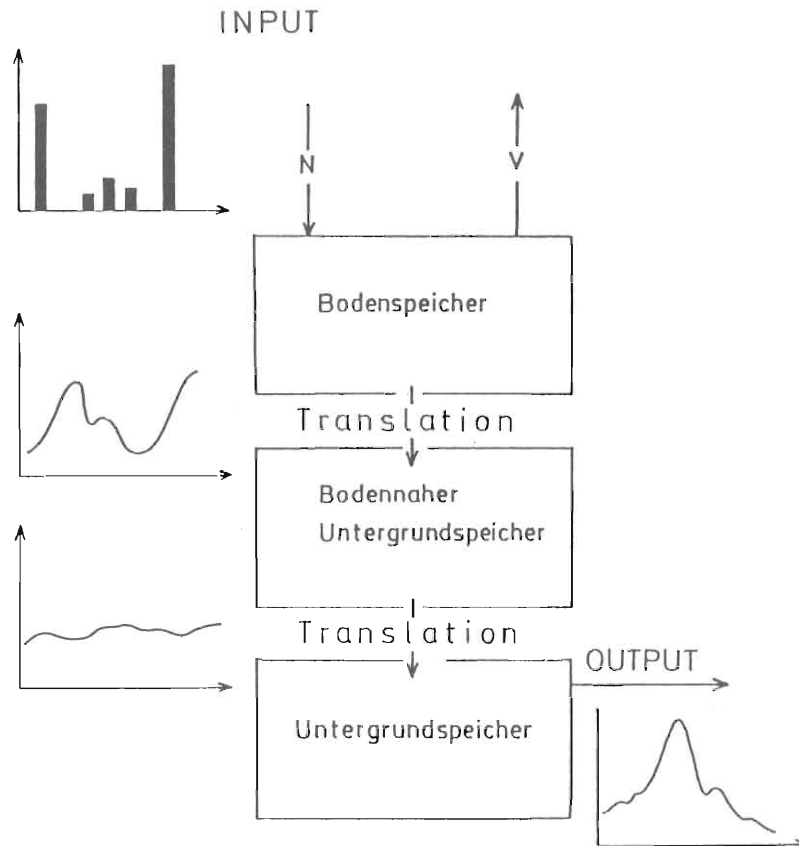


Abb. 2: Dreikomponenten-Modell der Niedrigwasser-Bildung mit der Verformung der Niederschlagsganglinie (input) zur Abflussganglinie (output).

Dabei wird die Input-Ganglinie durch die einzelnen Speicher bis zur Output-Ganglinie verformt, welche als messbarer Abfluss die Informationen der Entstehung verschlüsselt in sich trägt. Über die Ansprache der Einzugsgebietsausstattung werden die einzelnen Speicher berücksichtigt.

Studien haben auch gezeigt, dass sich mit **Kurzzeitmessungen** gute Einblicke in die Abflusscharakteristik erhalten lassen (LHG, 1988). Dies allerdings nur, wenn die Messungen in den Niedrigwasser-bildenden Jahren erfolgen (partielle Serie).

4. Die Abschätzung im schweizerischen Mittelland

4.1 Untersuchungsgebiete

Der Auswahl geeigneter Testgebiete wird in mehrfacher Hinsicht grosse Bedeutung beigemessen. Durch die mannigfaltigen anthropogenen Einflüsse und Eingriffe finden sich im Schweizer Mittelland kaum mehr Fließsgewässer mit einem natürlichen, unbeeinflussten Abflussverhalten.

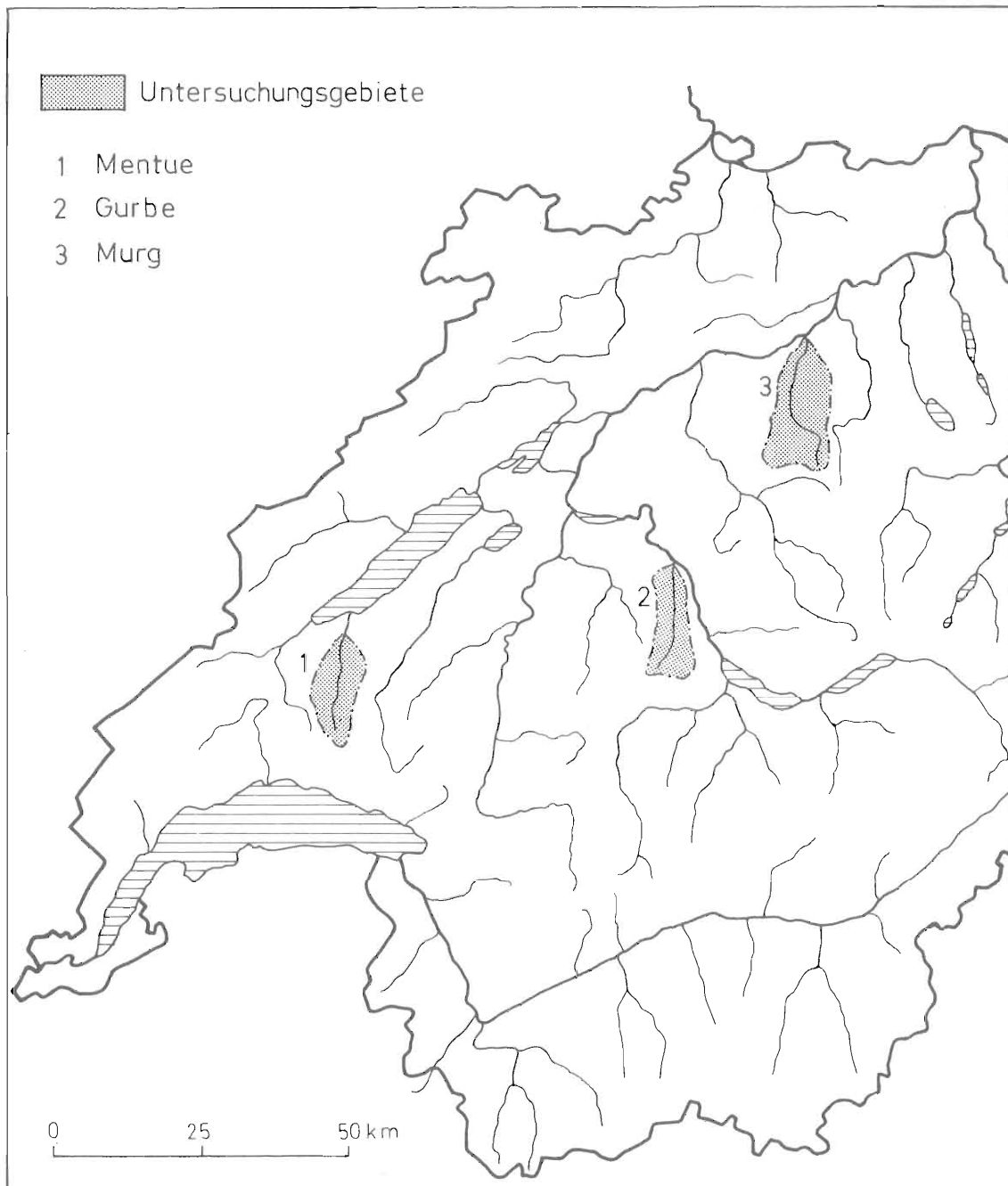


Abb. 3: Die drei Testgebiete zur Untersuchung der Niedrigwasserabschätzung (Q_{347}) im schweizerischen Mittelland

Bei der Auswahl der Untersuchungsgebiete musste im Hinblick auf Regionalisierung, darauf geachtet werden, eine möglichst breite "meteorologische und hydrologische Variabilität" zu erfassen.

Die drei ausgewählten Testgebiete Mentue, Gürbe und Murg passen in den durch die Problemstellung geforderten Rahmen:

- Lage im Schweizerischen Mittelland mit einer mittleren Höhe unter 1550 m ü.M.
- Erfassbare anthropogene Beeinflussung (Ab- und Zuleitungen)
- Gute Datenlage
- Unterschiedliche Einzugsgebietskennwerte
- Verschiedenen Abflussregimetypen zugehörig

Die drei Testeinzugsgebiete sind unterteilt in acht Teileinzugsgebiete (Abb. 3). Dies erlaubt eine differenziertere räumliche Betrachtung des Abflussprozesses.

4.2 Datengrundlage und Standardperiode

Selbst in den drei ausgesuchten Testgebieten sind die Daten jedoch nicht lückenlos vorhanden. Mit dem Wissen, dass Niedrigwasserdaten schon mit einem relativ grossen Fehler behaftet sind, sollten für die Analysen nur gemessene und nicht generierte Werte verwendet werden. Nicht zufriedenstellende Ergebnisse werfen sonst die Frage auf, ob das Modell oder die Daten schlecht sind. Für die beiden Mentue-Stationen, Gürbe-Belp, Langeten-Huttwil und Langeten-Lotzwil liegen lückenlose Daten für 1976-1985 vor. Da sie von der Landeshydrologie und Geologie für die Jahrbücher bereits bearbeitet worden sind, werden Homogenität und Konsistenz vorausgesetzt.

Das Datenmaterial in den Einzugsgebieten der Stationen Gürbe-Burgistein und Roth-St.Urban und dem Teileinzugsgebiet Murg-Murgenthal ist nicht in gleicher Vollständigkeit vorhanden. Hier konnte nicht mit der vollen Zehnjahresperiode gearbeitet werden.

Der Artikel 4 des Entwurfes zum revidierten Gewässerschutzgesetzes verlangt, dass die Abflussmenge Q_{347} mittels einer 10-jährigen Messperiode von natürlichen Abflüssen bestimmt wird. Es war wünschenswert, das Trockenjahr 1976 in die Untersuchungsperiode aufzunehmen. Deshalb wurde die Periode 1976-1985 gewählt. Ein weiterer Grund für dieses Zeitintervall liegt in der zeitlichen Aktualität und die Verfügbarkeit der Daten.

4.3 Erste Ergebnisse

Die Ermittlung des Q_{347} -Wertes hat grundsätzlich auf der Analyse natürlicher Abflusswerte zu basieren. Deshalb wurde dieser Wert in den Testgebieten exemplarisch ermittelt. Dafür

musste die Beeinflussung durch künstliche Eingriffe erfasst werden. Die Möglichkeiten der Beeinflussung des Niedrigwassers in der intensiv genutzten Schweiz sind zahlreich. Die Erfassung der **anthropogenen Einflüsse** ist grundsätzlich sehr aufwendig. Die Untersuchungen in den Testgebieten haben aber ergeben, dass nur wenige Elemente wirklich relevant sind, nämlich:

Zu- und Ableitungen über die Einzugsgebietsgrenzen hinweg

- grosse Trinkwasserversorgungen,
- Abwasserentsorgungen,
- Industriewasserversorgungen,
- Einzelhofversorgungen bei mehr als 500 Einheiten.

Insbesondere der letzte Punkt (Einzelhofversorgungen) ist von praktischer Bedeutung, da bei der im Mittelland weit verbreiteten Streusiedlung der anfänglich befürchtete hohe Arbeitsaufwand damit entscheidend gesenkt werden kann. Die übrigen Elemente (Trinkwasser, Abwasser) sind relativ einfach zu erheben. Allerdings ergeben sich hier in fast allen Fällen Schwierigkeiten bezüglich der Messung der künstlichen Eingriffe, da sie im Hinblick auf eine Korrektur der Niedrigwasserabflüsse nicht mit genügend hoher Auflösung gemessen werden. Häufig muss aus Monatsmitteln auf die Tageswerte zurückgerechnet werden. Bei der Analyse von Tageswerten ist dies ungenügend.

Landnutzungsänderungen sind zwar z.B. als Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung und als Versiegelung in allen drei Testgebieten feststellbar, doch sind die langfristigen Auswirkungen auf das Niedrigwasser kaum quantifizierbar. In der im Projekt untersuchten Zehnjahresperiode ist die Möglichkeit nicht gegeben. Da überschlägige Berechnungen nur verschwindend kleine Werte ergeben haben, scheint eine Relevanz für die vorliegende Problemstellung nicht gegeben.

Ausserordentliche Schwierigkeiten bereiten die kurzfristigen, kaum quantifizierbaren **Wasserentnahmen zu Bewässerungszwecken**. Da sie sporadisch und meist mit dem Druckfass oder kleinen mobilen Pumpen erfolgen, sind sie in Wirklichkeit kaum mess- und feststellbar. Aufzeichnungen darüber gibt es keine. Es bleibt nur die Schätzung dieses Einflusses. Eine Möglichkeit, diese Entnahmemengen annähernd bestimmen zu können, liegt in der Analyse von Ganglinien und Dauerkurven. Auffallende Knicks weisen auf solche Einflüsse hin (Abb. 4).

Der Entscheid, wie weit es sich tatsächlich um künstliche Einflüsse handelt, bleibt aber teilweise offen, da auch natürliche Ursachen wie verminderter Speicherauslauf durchaus denkbar sind (WEISMAN, 1977). Unter Berücksichtigung der meteorologischen und hydrologischen Verhältnisse können mit dem Differenzenverfahren anthropogene Beeinflussungen EDV-mässig bearbeitet werden.

Die effektiven Differenzwerte zwischen Zu- und Ableitungen in der Periode 1976-85 liegen in den drei Testgebieten in folgenden Bereichen (Monatsmittel):

- Mentue-Yvonand + 0.045 bis 0.080 m³/s
- Gürbe-Belp + 0.011 bis 0.208 m³/s
- Murg-Murgenthal + 0.107 bis 0.154 m³/s

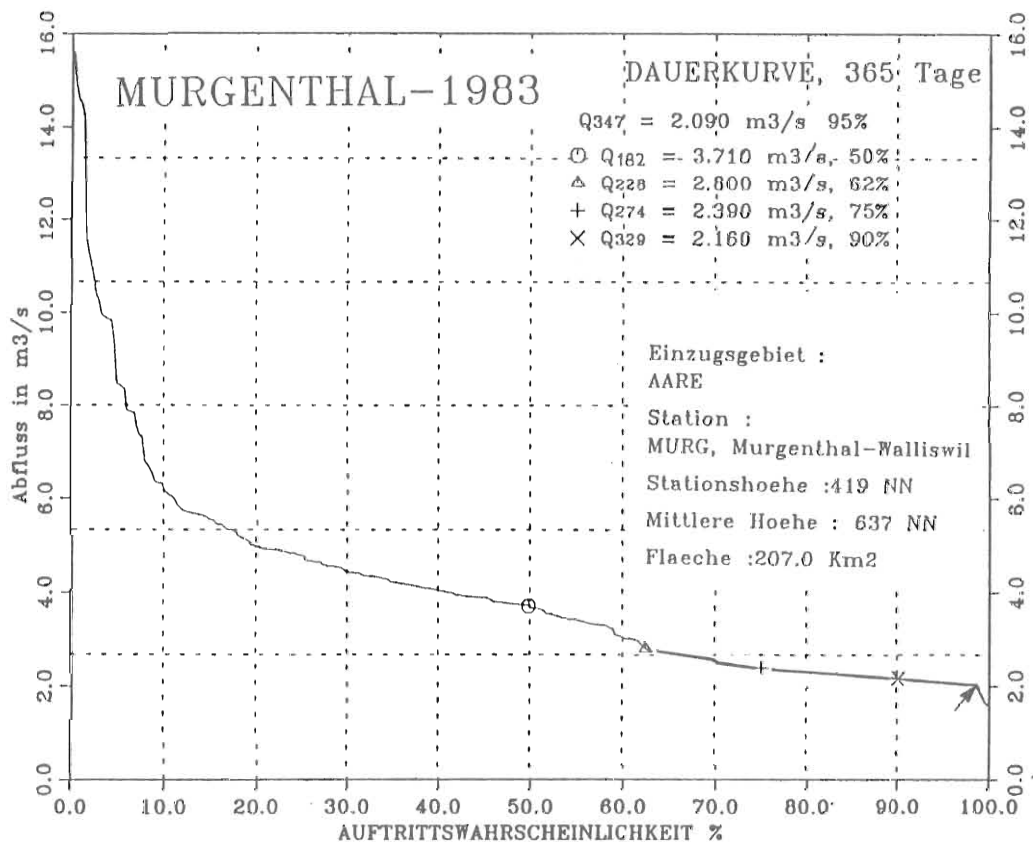


Abb. 4: Die niedrigsten Abflusswerte sind durch einen scharfen Knick in der Dauerkurve (Pfeil) abgetrennt. Die Ursache dürfte in anthropogener Beeinflussung, hier Bewässerung, liegen.

Bezogen auf den gemessenen Niedrigwasser-Abfluss bedeutet dies folgende minimale bzw. maximale Abweichung bei einzelnen Tagesmitteln:

- Mentue-Yvonand 11 - 34 %
1977 1976
- Gürbe-Belp 7 - 41 %
1977 1976
- Murg-Murgenthal 4 - 14 %
1980 1976

Betrachtet man die Anteile der einzelnen Tage (Datum) wie sie zum Q_{347} beitragen, sieht man, dass es oft nur wenige Jahre sind, die überhaupt erscheinen. So ist eine Eingrenzung auf wenige Jahre und Monate möglich. Extrempereioden wie 1972, 1976 und 1985 haben einen überproportionalen Einfluss.

Das abszissengemittelte Q_{347} von Mentue-Yvonand wird lediglich aus Werten von nur vier Jahren gebildet, wobei das Jahr 1976 mit 91 Tagen schon 50% einnimmt. Bei Mentue-Dommartin demgegenüber sind acht Jahre am Q_{347} beteiligt (Tab. 1).

Tab. 1: Anteil der einzelnen Jahre (Anzahl Tage) am abszissengemittelten Q_{347} in der untersuchten Standardperiode

Station	Tage pro Jahr									
	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
Dommartin	74	3	10	9	0	10	0	22	14	41
Yvonand	91	0	0	45	0	0	0	0	20	25

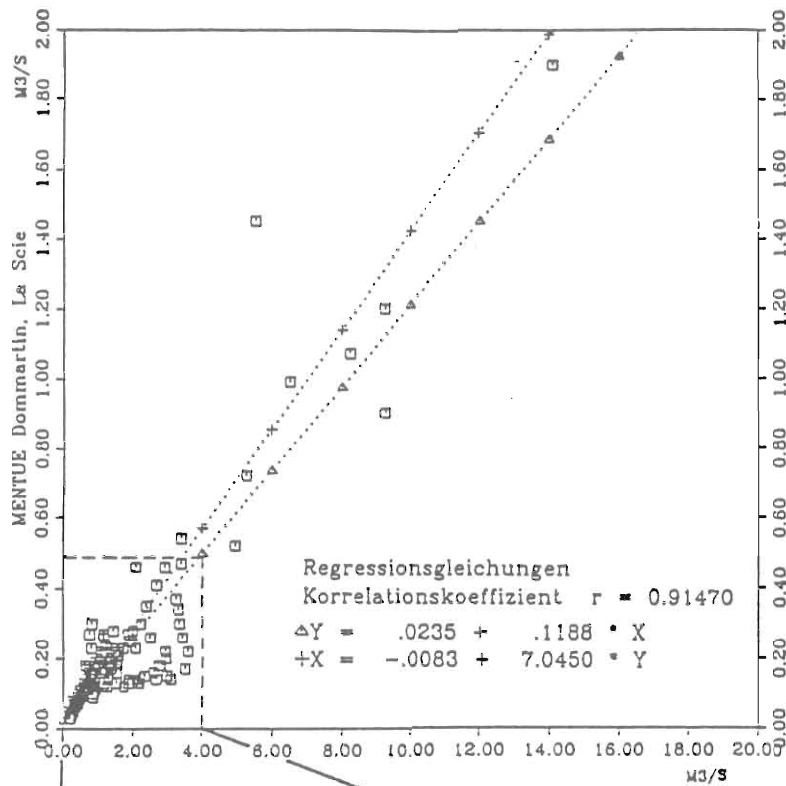
Auch hier zeigt sich wieder die Individualität der einzelnen Einzugsgebiete in Bezug auf Niedrigwasser. Ebenso wird erkenntlich, dass sich ober- und unterliegende Stationen nicht gleich verhalten müssen und dass die Einzugsgebietsfläche (Speichervolumen), Niederschlagsverteilung und Höhe einen erheblichen Einfluss auf die Niedrigwasserbildung besitzen.

Aus dem bisher Gesagten ergibt sich, dass Niedrigwasser-Abflüsse im Schweizerischen Mittelland nicht einfach mit linearen Regressionen übertragen werden können. Bei der mit der Regression verbundenen Ausmittlung gehen die Extremwerte des Niedrigwassers im Datenkollektiv unter. Da sie sich jedoch als Extremwerte anders verhalten als die übrigen Werte des Datenkollektivs, können sie damit nicht erklärt werden (Abb. 5a und 5b).

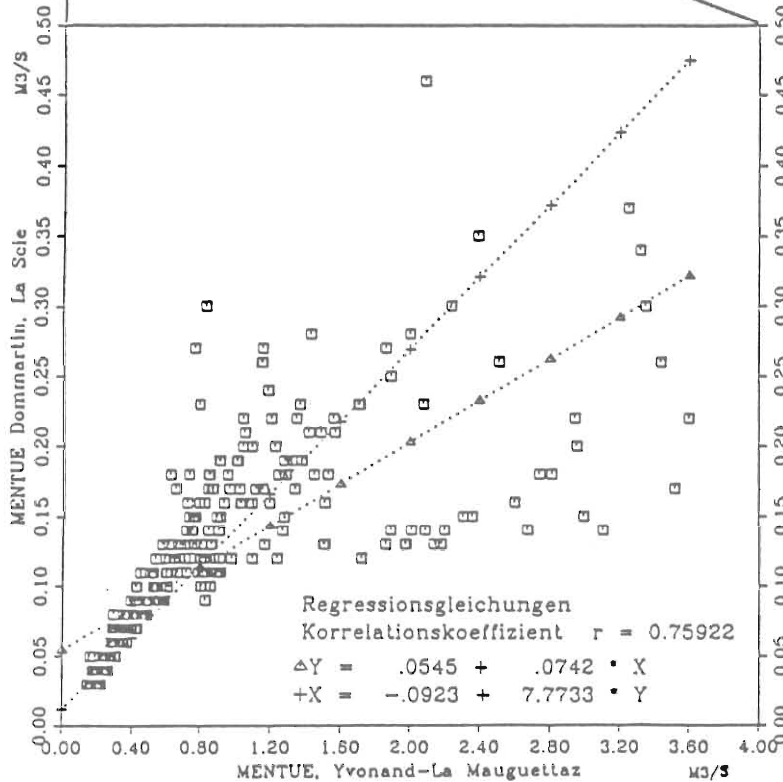
Aufgrund der bisherigen Analysen können Q_{347} -Ereignisse in zwei Gruppen unterteilt werden:

- **Statistisch abhängige Werte.**

Der aus der Dauerkurve stammende Q_{347} -Wert wird aus Werten längerer zusammenhängender Niedrigwasserperioden gebildet. Die Analyse minimaler Abflüsse zusammenhängender Tage (NQ18) liefert demzufolge ähnliche Ergebnisse. Dieser Effekt ist vor allem in kleinen Einzugsgebieten zu beobachten. Bei grossen Einzugsgebieten machen sich die Inhomogenitäten verstärkt bemerkbar, so dass der NQ(18)-Wert etwa 20 % höher als der Q_{347} -Wert liegt. Die statistisch abhängigen Werte fallen hauptsächlich in Trockenjahren (1976, 1985) an.



5a)



5b)

Abb. 5: Im gesamten Datenkollektiv ergibt sich eine recht gute Korrelation (5a). Werden nur die Niedrigwasserwerte in die Rechnung einbezogen, zeigt sich die grosse Streuung deutlich (5b). Lineare Regressionen können zur Übertragung von Werten deshalb nur bedingt verwendet werden. (Werte von 1976).

- Statistisch mehr oder weniger unabhängige Werte.

Diese Q_{347} -Werte (18 Dauerkurvenwerte) treten charakteristischerweise über mehrere Monate verteilt und vorwiegend in Feuchtjahren auf. Sie gehen in ihrer Entstehung auf andere Mechanismen zurück und liegen generell höher als die aus den statistisch abhängigen Werten gebildeten Kennzahlen. Die entsprechenden NQ-18-Werte liegen nochmals deutlich höher.

Um weitere Einblicke in die Entstehungsmechanismen zu bekommen, wurde die **Summe der Niederschläge** der letzten 40 Tage vor dem Dauerkurvenereignis diesen Werten gegenübergestellt. Sie können aber die extremen Niedrigwasserabflüsse und Niedrigwasserperioden nicht erklären, da keine erkennbare Korrelation zwischen den Niederschlagssummen und den zugehörigen Niedrigwasserabflüssen besteht.

Tab. 2: Die Gegenüberstellung der Niederschlagssummen aus den 40 Vortagen ausgewählter Perioden zum (konstanten !) Niedrigwasser-Abfluss zeigt keine einheitliche Abhängigkeit.

Datum	Abfluss [m ³ /s]	Σ Nieder- schlag 40 Tage [mm]
15.7.76	0.03	12.8
16.7.76	0.03	12.8
17.7.76	0.03	12.8
30.6.76	0.03	35.0
1.7.76	0.03	35.0
2.7.76	0.03	35.0
27.6.76	0.03	60.6
3.8.76	0.03	109.0
4.8.76	0.03	109.0
19.8.76	0.03	136.4
20.8.76	0.03	136.4
21.8.76	0.03	136.4
22.8.76	0.03	135.0
23.8.76	0.03	127.0
24.8.76	0.03	127.0
25.8.76	0.03	127.0
26.8.76	0.03	127.0
27.8.76	0.03	125.6
28.8.76	0.03	109.3
10.7.76	0.03	11.5
11.7.76	0.03	11.5
12.7.76	0.03	3.6
28.6.76	0.03	54.2

Eine Differenzierung in mehrere Speicherkomponenten und die Berücksichtigung längerer Betrachtungsperioden (≥ 100 Tage) ist unumgänglich.

5. Schlussfolgerungen

Das Niedrigwasser weist eine Charakteristik auf die eine Abschätzung von Niedrigwasserwerten sehr schwierig gestaltet. Die Schwierigkeiten liegen vor allem darin, dass die das Niedrigwasser bildenden Faktoren und ihre Wirkungsweise nur ungenügend bekannt sind.

Mit der in der Schweiz heute offiziell verwendeten Niedrigwasser-Kennzahl " Q_{347} " kann das Niedrigwassergeschehen nur ungenügend charakterisiert werden, da die Komplexität der Vorgänge nicht mit einem einzigen Wert beschreibbar ist.

Die aus der Wasserwirtschaft bekannten statistischen Verfahren reichen für die vorliegende Problemstellung nicht aus. Die bisher angewendeten mathematischen und graphischen Auswerteverfahren gehen vom Speicherauslauf aus ohne die hydrologische Vorgeschichte zu berücksichtigen. Es gilt deshalb diese Verfahren entsprechend weiterzuentwickeln.

Aufgrund erster Analysen in drei Testgebieten im Schweizerischen Mittelland kann festgestellt werden, dass die einzelnen Einzugsgebiete eine hohe individuelle Prägung aufweisen, die eine gleichartige Behandlung erschweren. Die generelle Übertragung von Werten in Bereiche des Niedrigwassers sind mindestens vorläufig noch nicht möglich.

Da der Q_{347} -Wert letztlich als natürlicher Abflusswert ausgewiesen werden muss, ist die Erfassung der anthropogenen Beeinflussung unumgänglich. Allerdings ist die Erfassung auf Tagesbasis nur bedingt möglich, so dass hier Unsicherheiten zurückbleiben. Als wichtigste Arten anthropogener Beeinflussung sind die Zu- und Ableitungen der Trinkwasserversorger und Abwasserentsorger erkannt worden.

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, dass neben der Verfeinerung der oben beschriebenen Analyseverfahren weitere Parameter miteinbezogen werden müssen.

ÜBER DIE VORHERSAGE VON NIEDERWASSERABFLÜSSEN

Holger Jensen und Herbert Lang

Abteilung Hydrologie, Geographisches Institut ETH Zürich,
Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich

Zusammenfassung

Dieser Beitrag behandelt die Möglichkeiten von Echtzeit-Abflussvorhersagen. Dabei liegt die Betonung auf den Verhältnissen am Rhein und im Alpenraum mit Fallbeispielen. Drei Arten von Vorhersagen werden unterschieden: 1. Eine Langfristvorhersage unter der Bedingung einer unteren Grenze der Abflussbildung aus Schneeschmelze und aus Niederschlag. 2. Eine Mindestabfluss-Vorhersage ohne effektive Abflussbildung. 3. Eine Niederwasser-Vorhersage unter Einbezug von meteorologischen Prognosen über die Dauer einer Trockenperiode.

Die Erstellung von Echtzeit-Niederwasser-Vorhersagen (realtime forecasting) hat jeweils die spezifische hydrologische Situation des Ausgabezeitpunktes zu berücksichtigen. In einem ersten Beispiel wird eine Niederwasser-Vorhersage für den Rhein bei Rheinfelden vorgestellt, definiert als der kumulierte Abfluss mit einer 10% Unterschreitungswahrscheinlichkeit.

Im zweiten Beispiel wird für den Rhein bei Rheinfelden und seine Teilgebiete gezeigt, wie mittels einer einfachen Methode für grössere Einzugsgebiete Trockenwetterabflüsse vorhergesagt werden können unter der Annahme, dass während der Vorhersagezeitspanne für die Abflussbildung ungünstigste meteorologische Bedingungen herrschen.

Résumé.

Cette contribution traite des possibilités de prévision de débit en temps réel. L'accent est mis sur les conditions sur le Rhin et dans les Alpes avec des exemples. On distingue trois types de prévisions: 1. Une prévision à long terme sous la condition d'une limite inférieure de l'écoulement provenant de la fonte des neiges et des précipitations. 2. Une prévision de l'écoulement minimal sans écoulement effectif. 3. Une prévision d'étiage en tenant compte de prévisions météorologiques sur la durée d'une période de sécheresse.

La construction de prévisions d'étiages en temps réel (real-time forecasting) doit chaque fois prendre en considération la situation hydrologique spécifique de l'instant de la prévision. Dans un premier exemple, on présente une prévision d'étiage pour le Rhin à Rheinfelden, définie comme le débit cumulé avec une probabilité de dépassement (en moins) de 10%.

Dans le deuxième exemple, on montre, pour le Rhin à Rheinfelden et ses bassins d'alimentation secondaires, comment, à l'aide d'une méthode simple pour des bassins d'alimentation plus importants, des débits par temps sec peuvent être prévus, avec l'hypothèse que pendant l'intervalle de temps pour la

prévision de l'écoulement, des conditions météorologiques défavorables ont régné.

1. Einleitung

In diesem Beitrag zum Thema Niederwasser-Vorhersage wird der "Echtzeitfall" behandelt. D.h. es geht um das Problem, für ein bestimmtes Einzugsgebiet zu einem meist operationell feststehenden Zeitpunkt den zukünftigen Abfluss in der daran anschliessenden Vorhersageperiode vorherzusagen. Diese Art von Echtzeit-Vorhersage (realtime-forecast) ist zu unterscheiden vom "Bemessungsfall" (Gutknecht 1978), bei dem der geschätzte Abfluss mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftritt, jedoch ohne Angabe des Zeitpunktes (prediction).

Bei der Echtzeit-Vorhersage bestimmen jeweils auch die spezifischen meteorologisch-hydrologischen Verhältnisse der Vorperiode bis zum aktuellen Zeitpunkt der Prognosenausgabe den vorherzusagenden Abfluss (die Ausdrücke Vorhersage und Prognose werden hier synonym verwendet). Dazu kommen je nach Art der Niederwasser-Vorhersage bestimmte Annahmen über die meteorologischen Bedingungen der Prognoseperiode oder meteorologische Vorhersagen.

In jedem Echtzeitfall von Niederwasser-Vorhersage sind die Füllungsgrade der verschiedenen Speicher eines Einzugsgebietes zum Zeitpunkt der Ausgabe der Niederwasser-Vorhersage wesentliche Prognoseelemente. Die richtige Erfassung und Modellierung dieser Speicher - Grundwasserspeicher, Bodenwasserspeicher, Gerinnespeicher, Seevolumen, Schneedecke-Wasseräquivalent - ist eine wichtige Voraussetzung für den Prognoseerfolg.

Im folgenden wird auf 3 verschiedene Arten von Niederwasser-vorhersagen eingegangen:

- 1) Eine Langfrist-Niederwasser-Vorhersage unter Annahme einer unteren Grenze der Abflussbildung in der Prognosenperiode.
- 2) Eine Mindestabfluss-Vorhersage im Sinne einer Trockenwetterkurve, also eine reine Abfluss-Rezessionslinie ohne Abflussbildende Prozesse in der Prognosenperiode.
- 3) Die dritte Art von Vorhersage wäre der Fall 1) oder 2) unter Einbezug einer meteorologischen Langfrist-Vorhersage über die Andauer der Trockenperiode. Dazu fehlen zur Zeit allerdings noch die nötigen gesicherten Grundlagen über langfristige atmosphärische Entwicklungen im Bereich Wochen bis Monate.

Prognosen der unter 1) und 2) genannten Art werden von der Abteilung Hydrologie, Geographisches Institut der ETH Zürich, für den Rhein bei Rheinfelden und für verschiedene Stauseenzuflüsse im Hochgebirge seit Jahren regelmässig erstellt (Vischer und Jensen 1978).

2. Langfrist-Niederwasser-Vorhersagen

Bei dieser Art von Vorhersagen ist der Niederwasserabfluss definiert als der Abfluss der Prognosenperiode, welcher unter den genannten Ausgangsbedingungen (Vorperiode, Ausgabezeitpunkt) mit nur geringer Wahrscheinlichkeit unterschritten wird. Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein genügend langer Messreihen der Abflüsse und der hydrometeorologischen Einflussgrößen für das betreffende Einzugsgebiet, welche über eine statistische Analyse die Aufstellung eines Regressionsmodelles ermöglichen.

Der Füllungsgrad der verschiedenen Speicher im Einzugsgebiet zum Zeitpunkt der Prognoseausgabe wird durch verschiedene dann verfügbare Messgrößen aus der Vorperiode berücksichtigt, wie z.B. (Vischer und Jensen 1978):

- Summe der Speichereinhalte von Seen im Einzugsgebiet
- Wasseräquivalent der Schneedecke von ausgewählten Stationen in verschiedenen Höhenbereichen
- Niederschlag einer Auswahl von Stationen
- Abfluss des Rheins bei Rheinfelden

Das Wasseräquivalent der Schneedecke ist in unseren alpinen Gebieten am Ende der winterlichen Akkumulationsperiode eine wichtige Einflussgrösse für den Abfluss während der sommerlichen Schmelzperioden: Bis zu Höhen von ca. 2700 bis 3000 m ü.M. wird dieser Speicher bis zum Ende der Schmelzperiode vollständig abgebaut und trägt besonders in Trockenzeiten wesentlich zur Abflussbildung bei.

Für die Vorhersageperiode, in unserem Beispiel ist es die Zeit 1. April bis 30. September 1989, müssen wir unter unseren klimatischen Bedingungen auch unter der Annahme eines relativ trockenen Jahres mit einer Art minimalen Abflussbildung aus Niederschlägen rechnen. Dazu addiert sich der relativ sichere Schmelzwasser-Abfluss und der sichere Abfluss aus der Entleerung der Wasserinhalte der übrigen Speicherräume des Einzugsgebietes. In unserem Beispiel gibt die Niederwasservorhersage einen kumulierten Abfluss, der mit einer Wahrscheinlichkeit von nur 10% unterschritten werden sollte (s. Bild 1).

3. Mindestabfluss-Vorhersagen

In diesem Fall handelt es sich um die Vorhersage einer Art "garantierten" Mindestabflusses, auch "gesicherter" Abfluss genannt ("assured" flow im englischen Sprachgebrauch). Der Einfluss der Vorperiode beschränkt sich dabei auf die zum Zeitpunkt der Ausgabe der Vorhersage im Gebiet vorhandenen flüssigen Wasservorkommen. Für die Vorhersageperiode selbst wird angenommen, dass keine effektive Abflussbildung aus Regen oder Schneeschmelze erfolgt. Damit haben wir es hier mit dem Fall der reinen "Trockenwetterkurve" zu tun (Rückgangslinie, Rezesions-Abfluss).

RHEIN / Rheinfelden

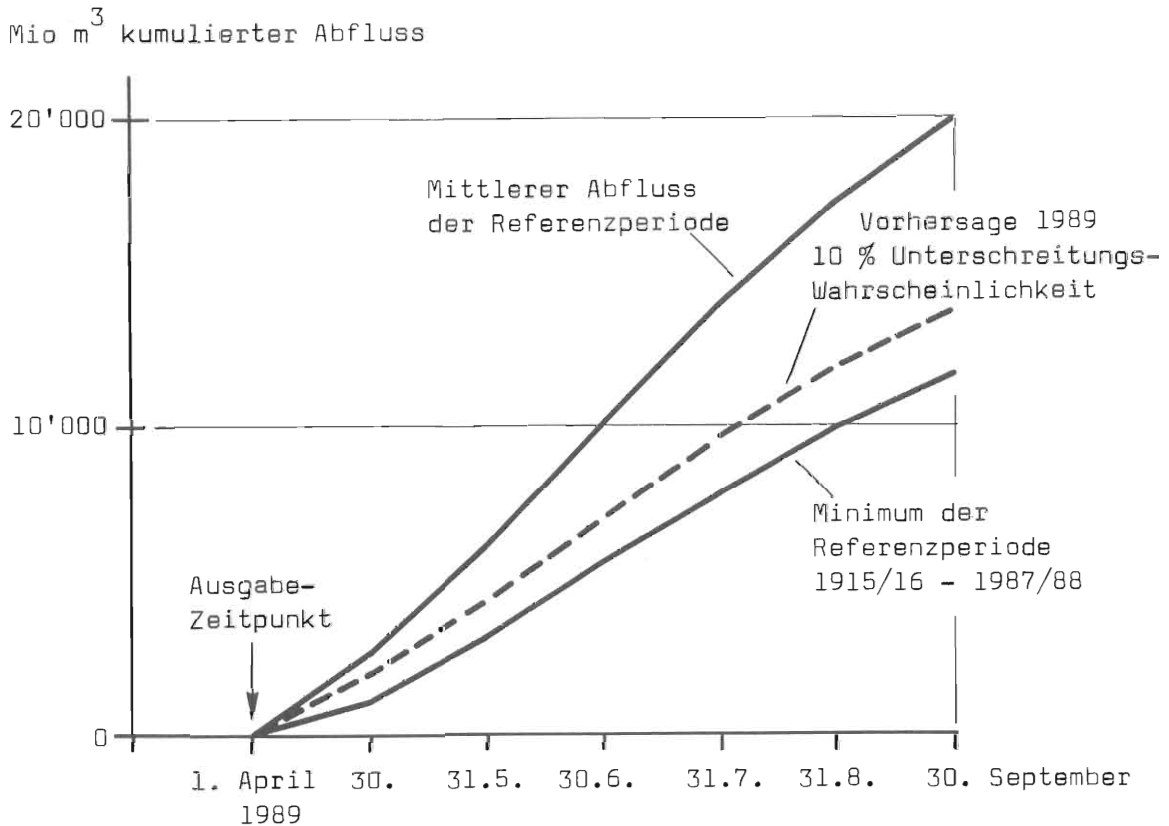


Bild 1 Beispiel einer operationellen Niederwasser-Vorhersage für den Rhein bei Rheinfelden (ca. 20 km oberhalb Basel, Einzugsgebiet 34550 km²). Ausgabezeitpunkt 1. April 1989. Vorhersage der kumulierten Monatsabflüsse bis April-September 1989 unter der Bedingung 10 % Unterschreitungswahrscheinlichkeit, d.h. es wird eine untere Grenze der Abflussbildung aus Niederschlag und Schneeschmelze angenommen. Wichtigster Prediktor ist dabei das Wasseräquivalent der Schneedecke im alpinen Teil des Einzugsgebietes zur Zeit der Prognosenausgabe.

In den tiefergelegenen Gebieten ist die Dauer von reinem Trockenwetterabfluss unter unseren klimatischen Bedingungen i.a. auf wenige Tage bis Wochen beschränkt. Da die Reichweite meteorologischer Prognosen zur Zeit mit maximal etwa 6-7 Tagen begrenzt ist, sind länger dauernde Trockenperioden so nicht erfassbar. Davon zu unterscheiden sind die klimatisch-jahreszeitlich bedingten Trockenwetterabflüsse

- a) bei den ständig unter dem Gefrierpunkt liegenden Temperaturen im Winter der Hochgebirge und der Polargebiete,
- b) reguläre Trockenzeiten in bestimmten Klimagebieten wie z.B. in subtropischen Monsungebieten.

3.1 Mindestabfluss-Prognosen für das Rheingebiet

Für die Erstellung von Mindestabfluss Prognosen wird das Einzugsgebiet des Rheins bei Rheinfelden in grössere Teilgebiete unterteilt, und zwar in die Einzugsgebiete des Bodensees, des Zürichsees, des Vierwaldstättersees, der Juraseen sowie auf das restliche Gebiet, das zwischen den genannten Seen und der Abfluss-Station Rheinfelden liegt und im folgenden kurz "Restgebiet" genannt wird. Der Abfluss des Restgebietes muss durch Differenzenbildung aus den Tagesmitteln der Abflüsse der Seen und des Rheins bei Rheinfelden bestimmt werden.

Durch Superposition der Mindestabfluss-Prognosen für die Teilgebiete wird eine solche für das gesamte Gebiet erhalten. Diese einfache Superposition dürfte während des grössten Teils des Jahres sinnvoll sein, weil die Mindestabflüsse in allen Teilgebieten gleichzeitig auftreten oder auftreten können. Während der sommerlichen Schneeschmelze ist diese Annahme jedoch nicht so ohne weiteres als gesichert zu betrachten.

Die Bilder 2 und 3 zeigen Beispiele von ausgegebenen Prognosen.

Methode

Zum Problem der Berechnung des Verlaufes der Tagesmittel des Abflusses bei Trockenwetter existiert eine umfangreiche Literatur. Eine umfassende Übersicht findet sich in Pereira (1977). In der gleichen Arbeit wird ein weiteres Verfahren für kleine, alpine Einzugsgebiete vorgeschlagen. Gloor und Walter (1986) behandeln das Problem für kleine Gebiete ohne Direktmessung.

Ähnlich wie Zecharias und Brutsaert (1988) sind wir von der Beziehung der Abflüsse aufeinanderfolgender Tage zueinander ausgegangen. Und zwar haben wir nach einer Methode gesucht, die für die Vorhersage im Falle unserer grossen Einzugsgebiete geeignet ist. Bild 4 zeigt die Punkte (Q_t, Q_{t+1}) für verschiedene Monate bei einer Referenzperiode von 20 Jahren im Falle des Restgebietes.

Anhand dieser Darstellungen sind Funktionen $y=f(Q)$ empirisch festgelegt worden (Streckenzüge), die iterativ angewandt und von einem Startwert Q_0 ausgehend den Mindestabfluss Q_t^* ergeben:

$$Q_1^*=f(Q_0), Q_2^*=f(Q_1^*), \dots, Q_{t+1}^*=f(Q_t^*), \dots$$

(der Stern dient zur Unterscheidung des berechneten Mindestabflusses vom beobachteten Abfluss Q_t).

Die Abweichung der Kurve $y=f(Q)$ von der 45°-Geraden ist eine Approximation der zeitlichen Ableitung der stetigen Ganglinie Q_t^* .

Zur Bestimmung der Funktion $y(Q)$ wurden neben den oben erwähnten Graphiken auch die Zeitreihen-Darstellungen der Tagesabflüsse über alle 20 Jahre verwendet. Eine Auswahl zeigen die

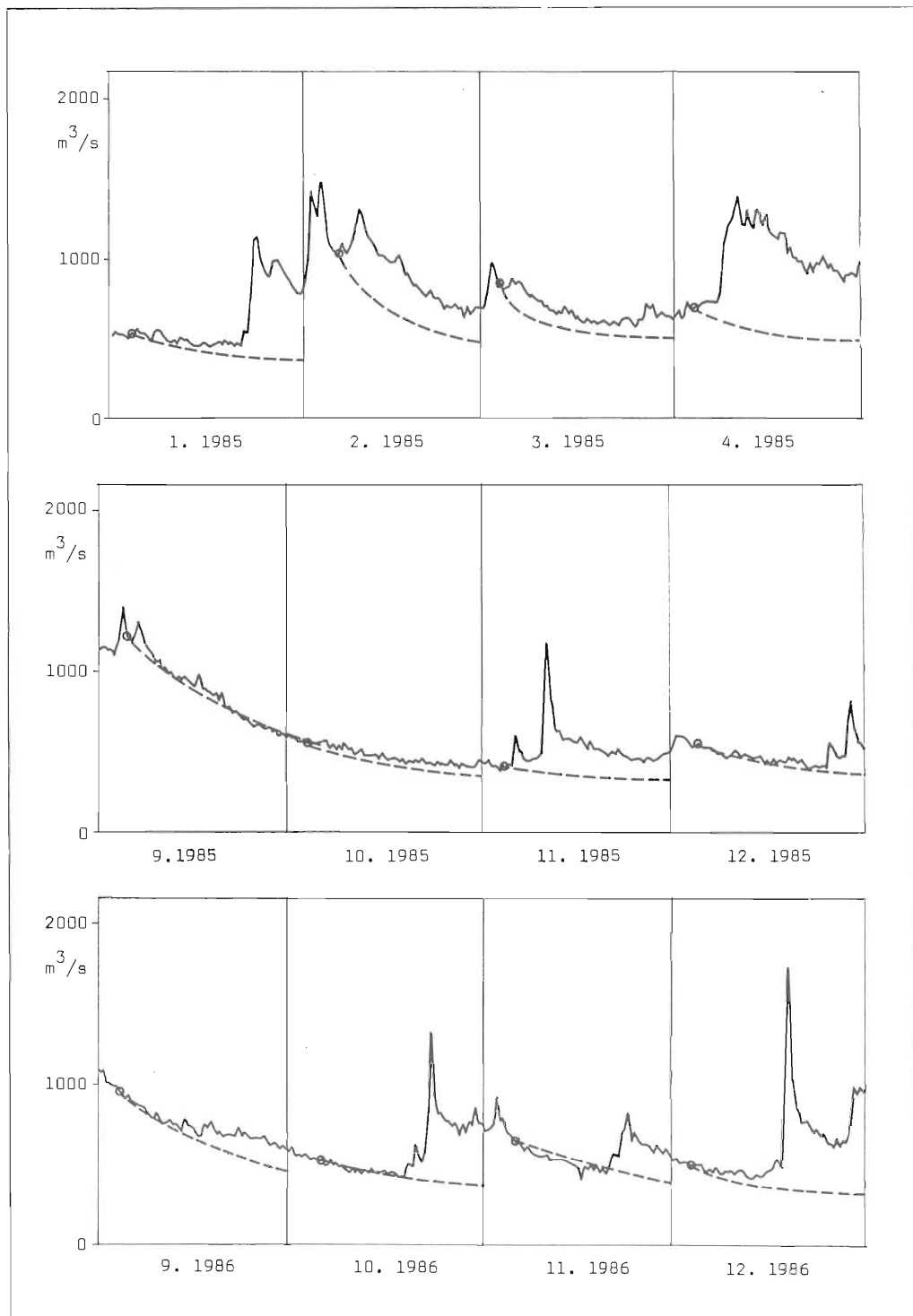


Bild 2 Beobachtete Tagesmittel des Rheins bei Rheinfelden und einmonatige Mindestabfluss-Prognosen. Die Prognosen sind an den mit einem Kreis markierten Tagen erstellt und ausgegeben worden.

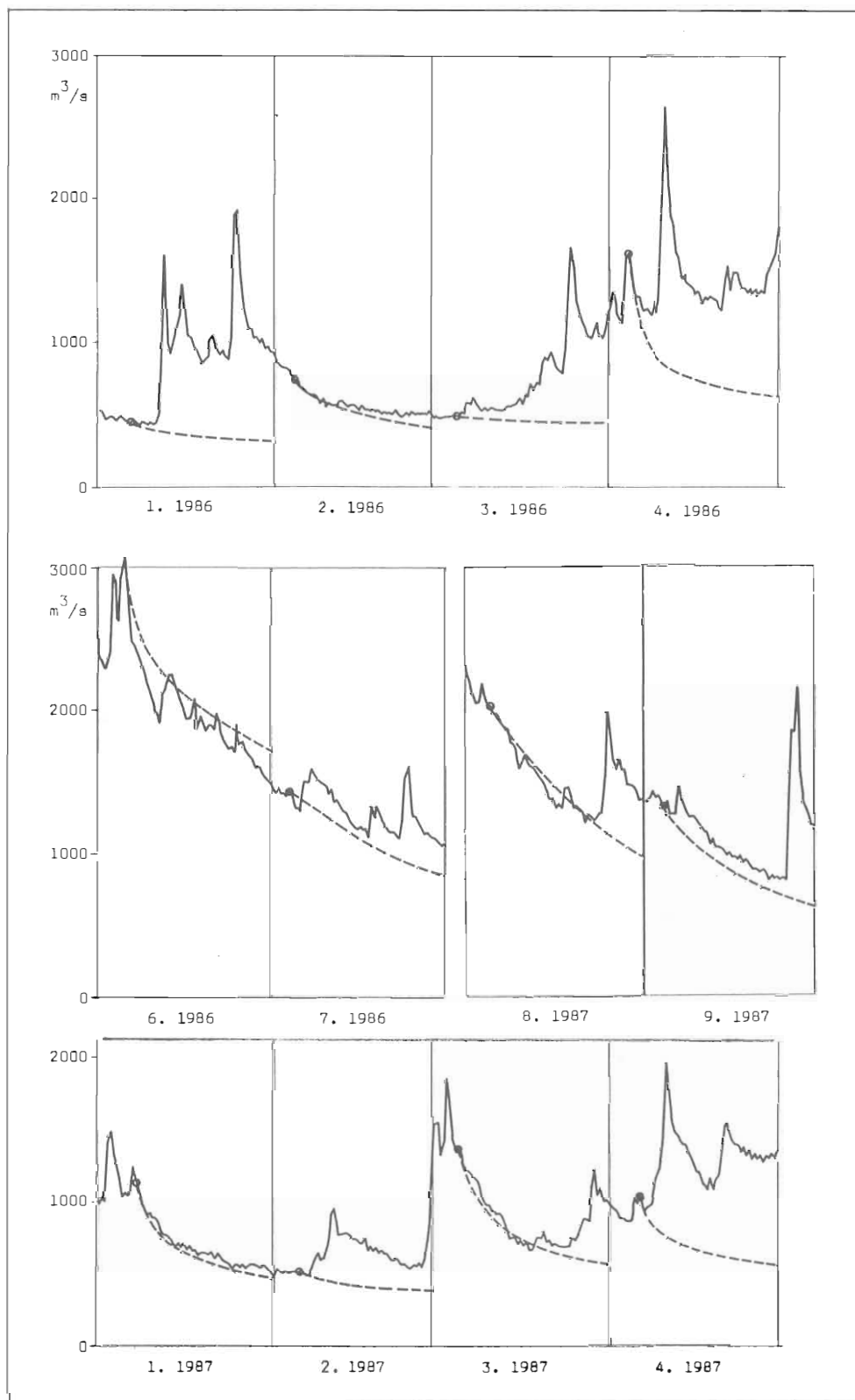


Bild 3 Fortsetzung von Bild 2

RESTGEBIETS-ABFLUSS,
1964-84 OHNE 82, 20 JAHRE

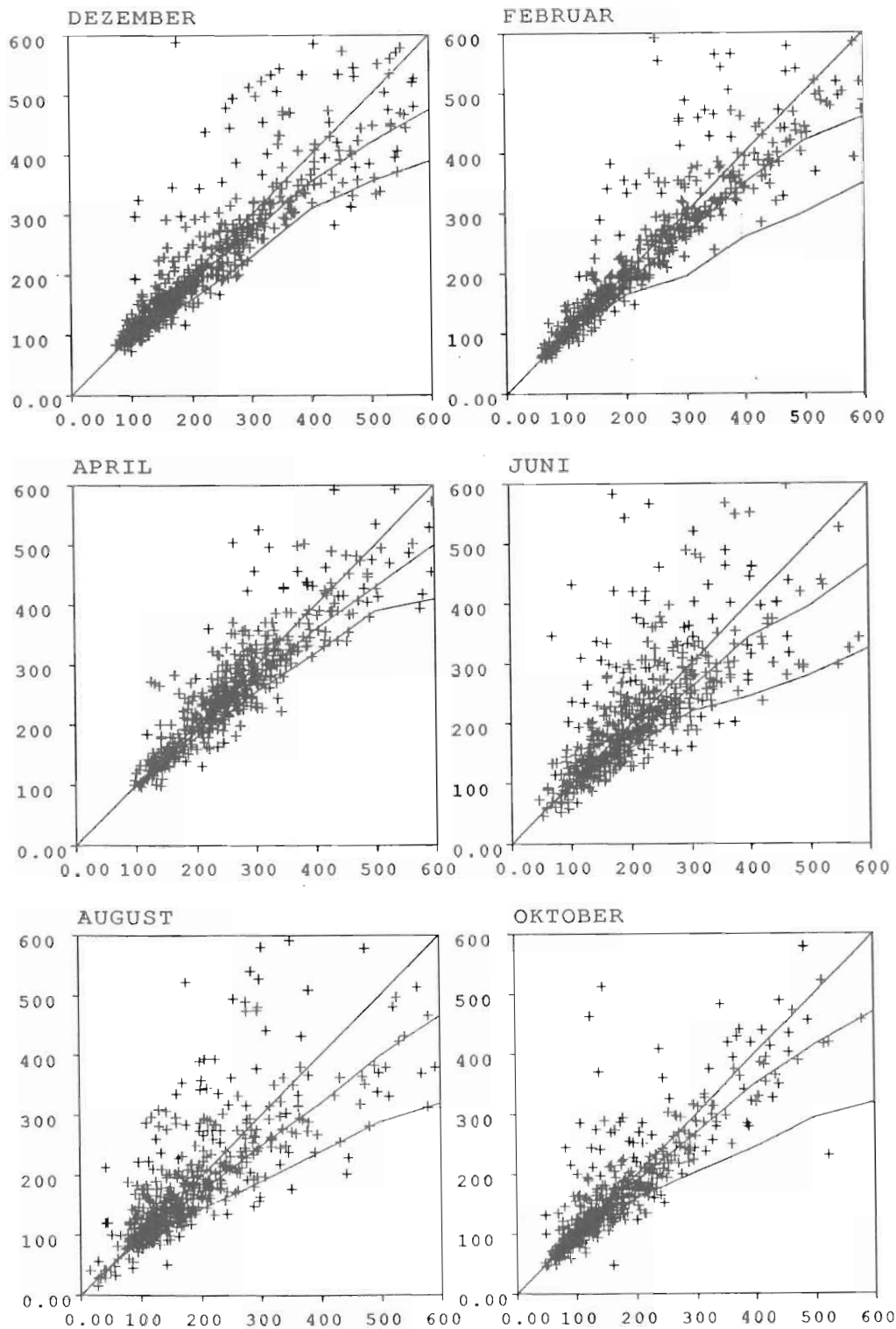


Bild 4 Abfluss aus dem Restgebiet zwischen den grösseren Seen und der Station Rheinfelden: Gegenüberstellung der Tagesmittel am Tag t und am Tag $t+1$. Die eingezeichneten Streckenzüge werden für die Berechnung der mehr-tägigen Prognose benutzt (siehe Text).

Bilder 6 und 7 im Falle des Restgebietes, und das Bild 8 im Falle der Thur bei Halden. Dabei ergaben sich die folgenden, als Hypothesen oder Modellannahmen formulierten Resultate:

- die Abflussganglinie strebt bei Trockenheit innerhalb des betrachteten Intervalles von etwa 30 Tagen gegen einen Grenzwert, der sich selbst nur langsam ändert, und der als Parameter der Funktion $y=f(Q)$ aufzufassen ist,
- der Grenzwert weist einen mehr oder weniger deutlichen Jahresgang auf, dürfte aber natürlich vorallem von der jeweiligen meteorologischen Situation in den vorangehenden Wochen und Monaten abhängig sein,
- es dürfte genügen, wenn für einen gemäss der betrachteten Jahreszeit hohen sowie für einen tiefen Grenzwert die entsprechenden Funktionen $y_1=f_1(Q)$ und $y_2=f_2(Q)$ empirisch bestimmt werden, für dazwischen liegende Grenzwerte kann zwischen y_1 und y_2 linear interpoliert werden,
- wenn bei mittleren bis grösseren Grenzwerten infolge eines kurzen, intensiven Niederschlages eine kleine aber abrupt ansteigende Abflussspitze auftritt, ist eine weitere Interpolation zwischen der bereits interpolierten Funktion y und der unteren y_2 angezeigt, wozu ein zweiter Parameter s eingeführt wird (Bild 5).

Ein offenes Problem bleibt die Vorhersage des Grenzwertes. Zu ihrer Ermittlung wird man nebst den Einflussgrössen des Abflusses auch die letzten beobachteten Grenzwerte heranziehen. Die Vorhersage muss sehr genau sein: ergibt sie zum Beispiel einen Wert, der grösser als der Startwert des Abflusses ist, so ist sie wertlos und muss mittels eines Adaptionsverfahrens ersetzt werden. Das Entsprechende gilt für offensichtlich zu kleine Werte.

Bei den Einzugsgebieten der Alpenrand- und Jura-Seen hängt der Grenzwert wegen des Einflusses der Seeretention und der Schnee- und Gletscherschmelze stark vom aktuellen Seevolumen und von der Jahreszeit ab. Seine Vorhersage ist deshalb weniger problematisch und kann aus den graphischen Gegenüberstellungen der Seevolumina z.B. am Monatsanfang und am Monatsende mittels der unteren Umhüllenden der Punkte gewonnen werden. Die Umhüllenden werden aufgrund einer langjährigen Messreihe für jeden Monat separat bestimmt. Bild 9 zeigt sie im Falle des Bodensees.

4. Niederwasserabfluss bzw. Mindestabfluss in Trockenperioden von langer Dauer

Die Wasserwirtschaft hätte ein besonders grosses Interesse, neben Vorhersagen über die Niederwasserabflüsse vor allem Vorhersagen über deren Dauer zur Verfügung zu haben. Wenn man von den regelmässigen jahreszeitlich bedingten Niederwasserperioden bestimmter Klimaregionen absieht (inklusive der temperaturbedingten Niederwasserabflüsse im Winter der Hochgebirge und der Polargebiete), bestehen zur Zeit für die mittleren

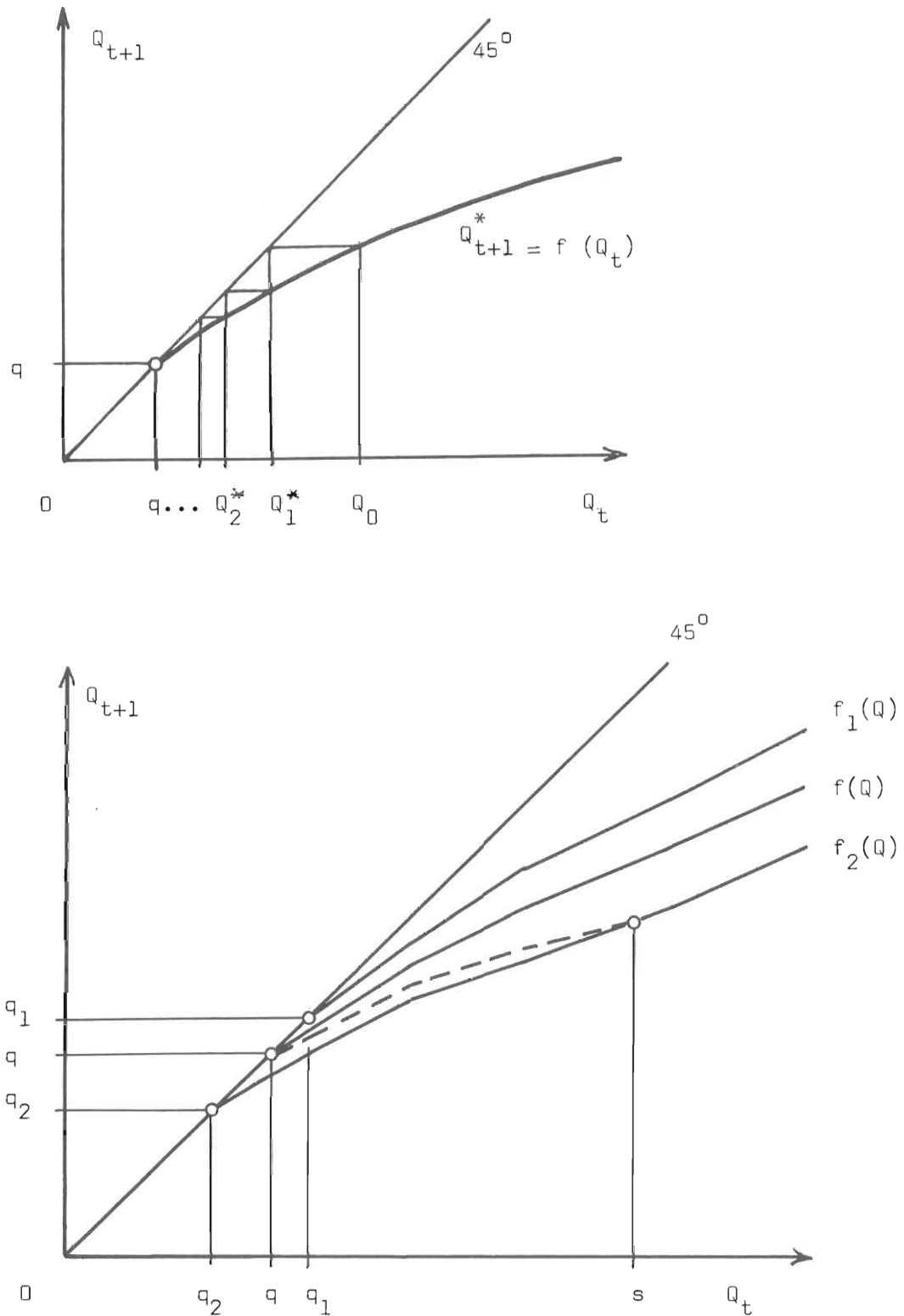


Bild 5 Abhängigkeit des Mindestabflusses am Tage $t+1$ vom Abfluss am Tage t und vom Grenzwert q . Schematische Darstellung der Funktion $Q_{t+1}^* = f(Q_t)$: Oben: iterative Anwendung zur Vorhersage des Mindestabflusses ausgehend von einem beobachteten Wert Q_0 . Unten: Interpolation der aktuellen Funktion $f(Q)$ zwischen den zwei extremen Funktionen der Referenzperiode, $f_1(Q)$ und $f_2(Q)$.

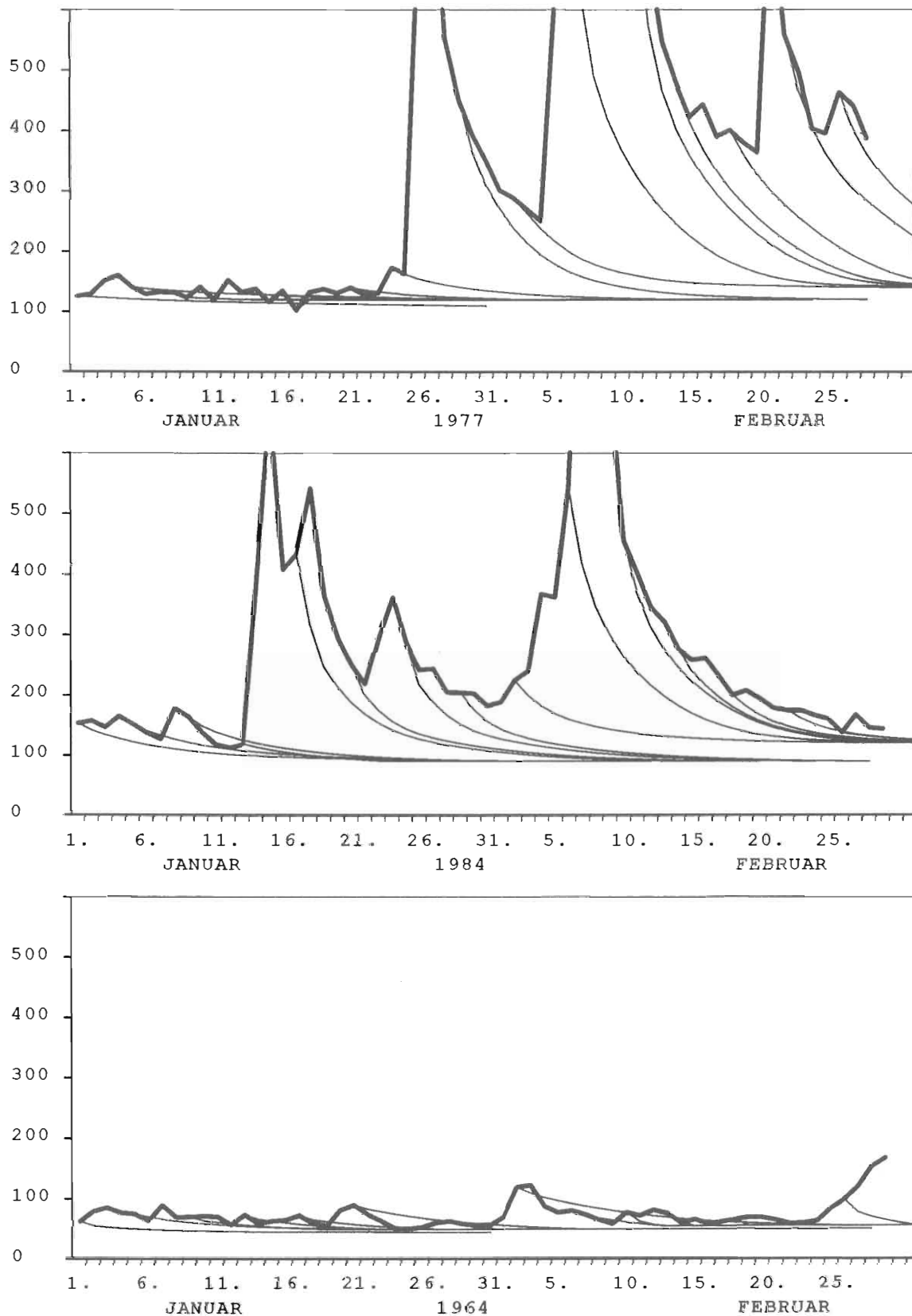


Bild 6: Tagesmittel des Abflusses aus dem Restgebiet zwischen den grösseren Seen und der Station Rheinfelden. Die dünnen Linien stellen Mindestabfluss-Prognosen dar, die anhand einer 20-jährigen Referenzperiode geeicht wurden. Sie sind zur Kontrolle im Nachhinein berechnet worden, mit Start an jedem vierten Tag.

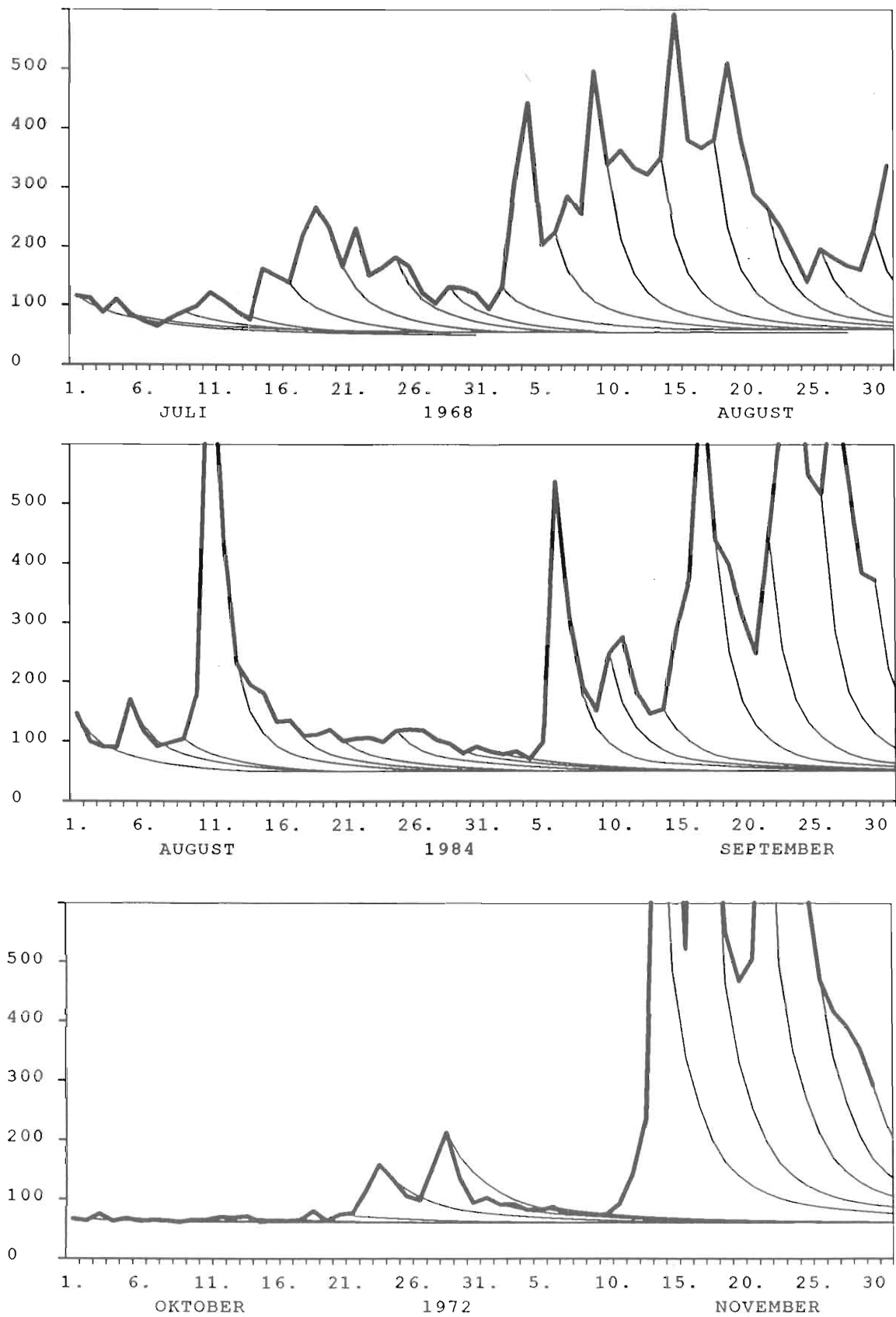
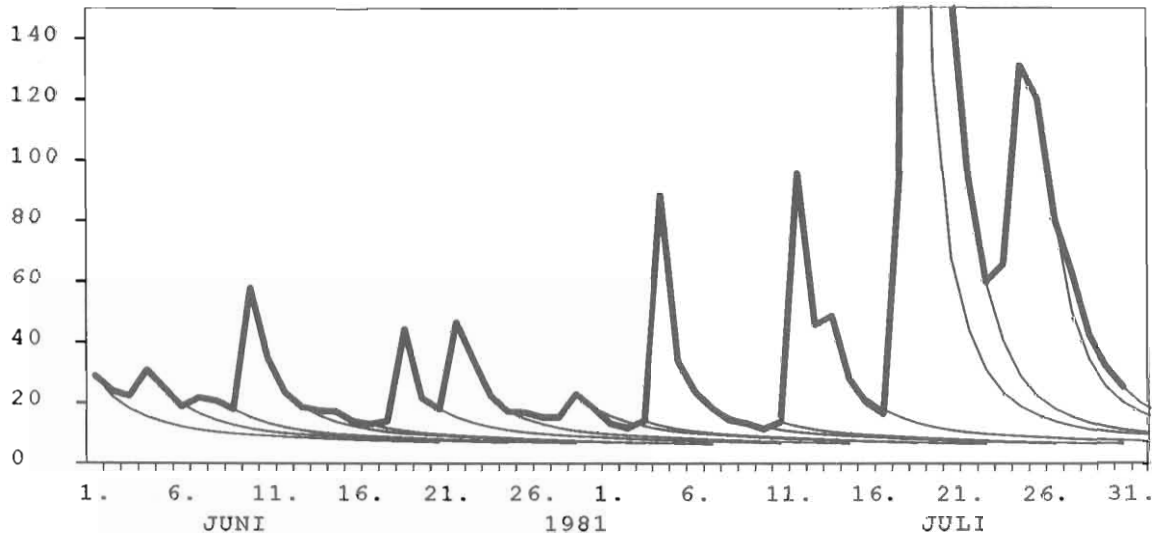
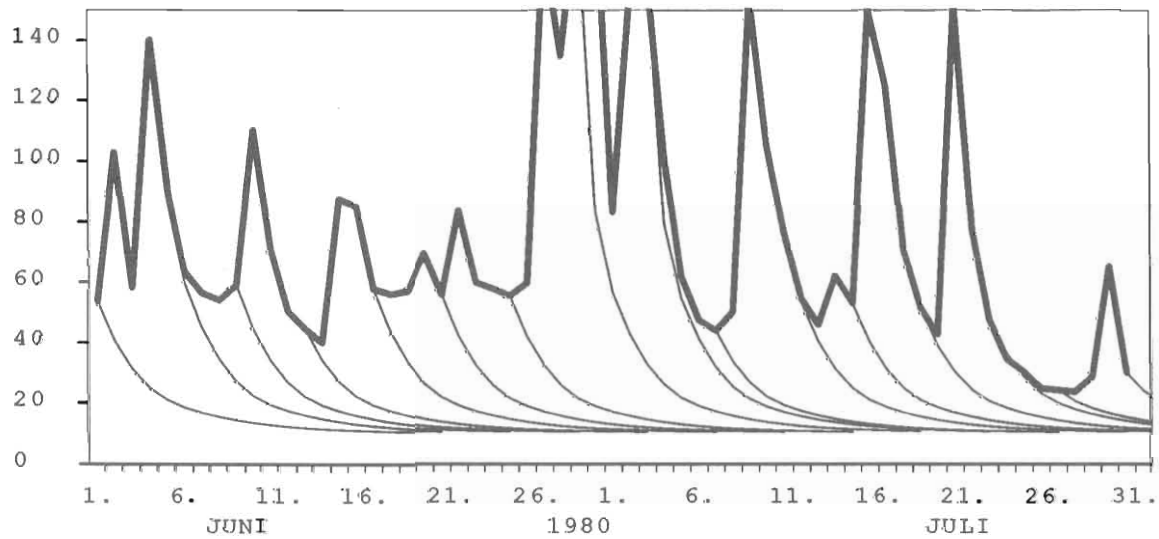


Bild 7 Fortsetzung von Bild 6.

THUR/HALDEN



THUR/HALDEN



THUR/HALDEN

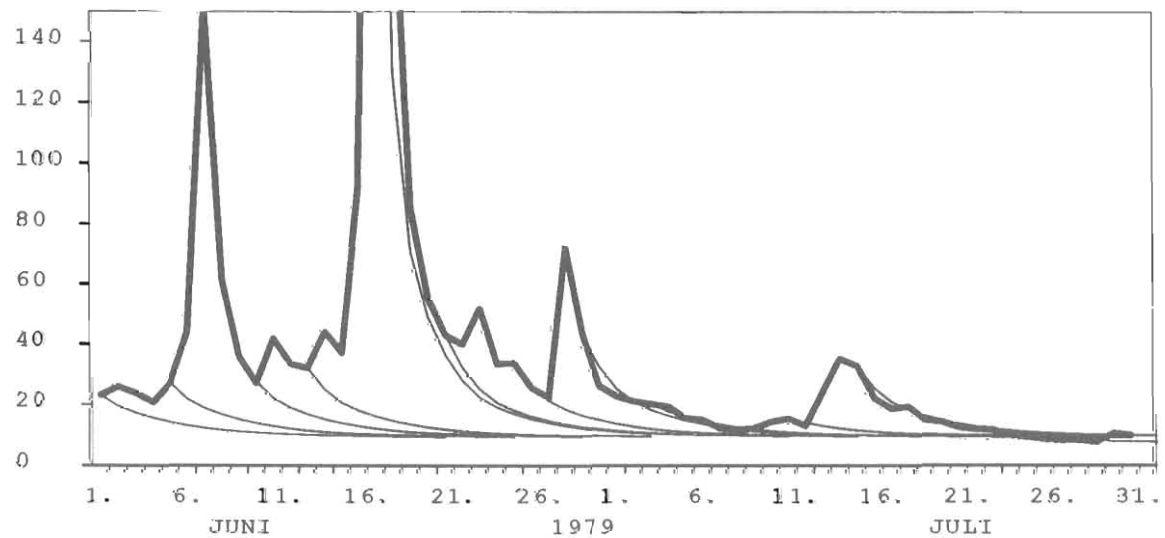


Bild 8: Wie Bilder 6-7, jedoch im Falle der Thur bei Halden.

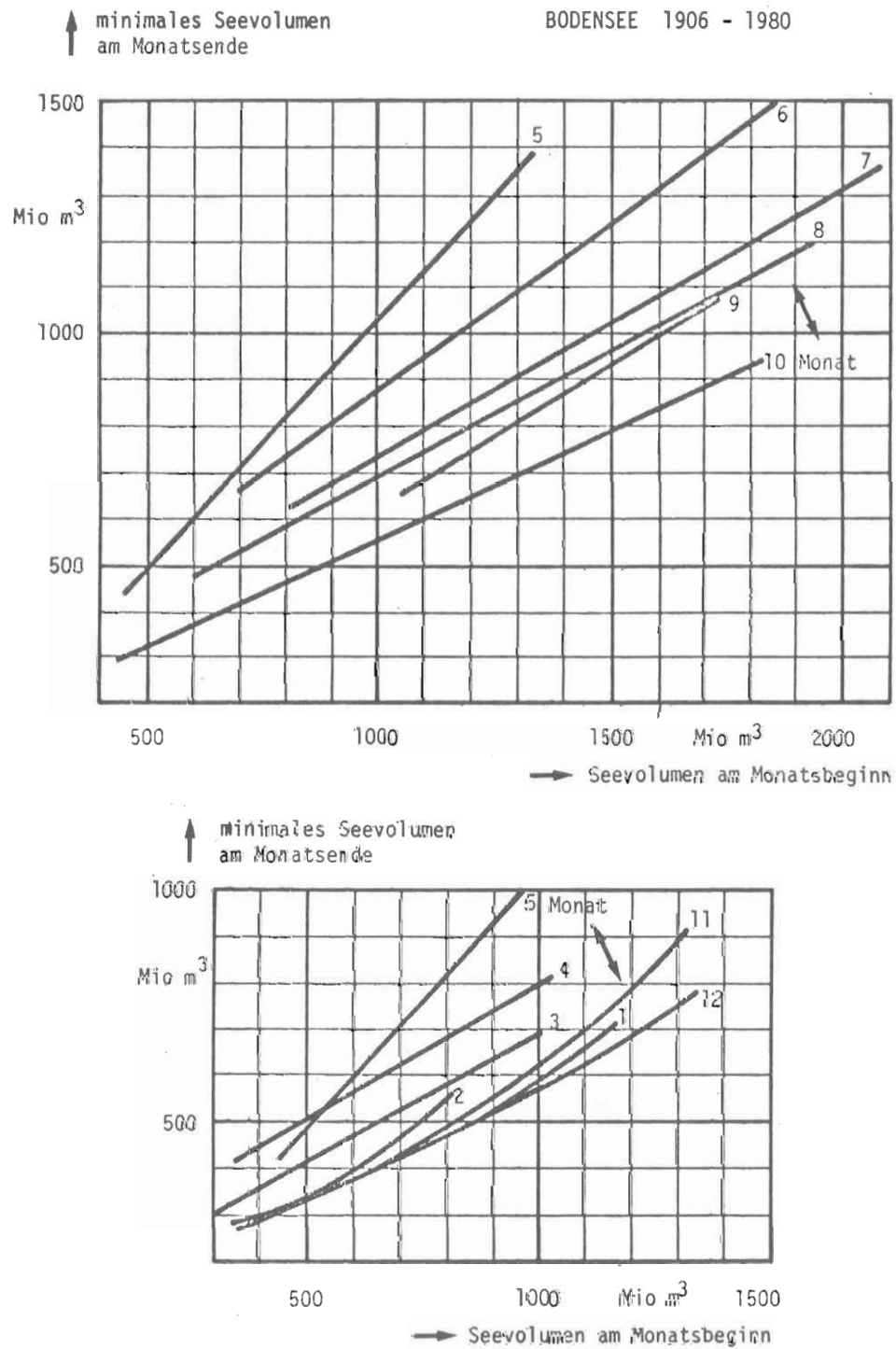


Bild 9 Minimales Seevolumen des Bodensees am Monatsende in Abhängigkeit vom Seevolumen am Monatsbeginn.

Breiten noch keine Möglichkeiten, die dazu nötigen meteorologischen Langfristprognosen zu erstellen.

Das jüngste Beispiel ereignete sich im Winter 1988/89. Diese längste, seit dem Beginn der regelmässigen Beobachtungen im Tessin verzeichnete Trockenperiode dauerte vom 7.12.88 bis zum 21.2.89 (77 Tage). Auch im übrigen Alpenraum wurden extreme Werte der Andauer trockener Witterung erreicht, so fielen im Zeitraum 24.12.88 bis 12.2.89 (51 Tage) in Zürich nur 3.6 mm Niederschlag, verteilt auf 4 Tage (SMA, 1988, 1989). Es bestand keine Möglichkeit, diese anhaltende extreme Situation vorherzusagen. Im besten Fall enthalten die Wetterberichte Angaben wie "kein Ende der trockenen Witterung in Aussicht", wobei auch auf die Erfahrung einer gewissen Persistenz bzw. eines Selbsterhaltungsmechanismus dieser relativ stabilen Wetterlagen abgestützt wird. Die längste, aus Chroniken überlieferte Trockenperiode im Rheingebiet ereignete sich im Jahre 1540 und dauerte vom 8. Februar bis 29. Juli, das sind 5 Monate und 21 Tage (!) (Gerhard 1978).

5. Schlussbemerkungen

Echtzeit-Niederwasservorhersagen sind für die Wasserwirtschaft, die Wasserkraftwerke und die Schifffahrt vor allem im Mittel- und im Langfristbereich von Interesse. Laufende Forschungsarbeiten zur Modellierung der Schneedecke und in der Entwicklung der Modelle der allgemeinen atmosphärischen Zirkulation (GCM) lassen schon in naher Zukunft reale Möglichkeiten für brauchbare meteorologische Langfrist-Vorhersagen und damit für verbesserte langfristige Niederwasser-Vorhersagen erwarten.

Dank

Für die Bereitstellung des französischen Textes der Zusammenfassung danken wir Frau Dipl.Ing. Martine Weber, VAW, ETH Zürich.

LITERATURVERZEICHNIS

- GLOOR, R. et M. WALTER (1986): Estimation des débits d'étiage sur des cours d'eau sans mesures directes. Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie, Nr. 33; Geographischer Verlag Kümmerly und Frey, Bern.
- GERHARD, H. (1978): Abflussregime. Kap. A5 in: Das Rheingebiet. Teil A, 107-159. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR).
- GUTKNECHT, D. (1978): Methoden der hydrologischen Kurzfristvorhersage. Wiener Mitt., Bd.26, Wien.
- PEREIRA, L.A.S. (1977): Etudes de tarissement sur des petits bassins versants de montagne. Institut d'Hydromécanique et d'Amenagement des Eaux EPF Zurich.

- PEREIRA, L.S. and H.M. KELLER (1982): Factors affecting recession parameters and flow components in eleven small Pre-Alp basins. Hydrological Aspects and Alpine and High Mountain Areas (Proceedings of the Exeter Symposium, July 1982). IAHS Publ. no. 138.
- PEREIRA, L.S. and H.M. KELLER (1982): Recession characterization of small mountain basins, derivation of master recession curves and optimization of recession parameters. Hydrological Aspects of Alpine and High Mountain Areas (Proceedings of the Exeter Symposium, July 1982). IAHS Publ. no. 138.
- SMA (1988, 1989): Witterungsberichte. Schweiz. Meteorologische Anstalt, Zürich.
- VISCHER, D. und H. JENSEN (1978): Langfristprognosen für den Rheinabfluss bei Rheinfelden. Wasserwirtschaft, 68.Jg., Heft 9, Sept. 1978.
- WMO (1975): Hydrological forecasting practices. Operational Hydrology, Report No. 6.
- ZECHARIAS, Y.B. and W. BRUTSAERT (1988): Recession characteristics of groundwater outflow and base flow from mountainous watersheds. Water Resources Research vol. 24, no. 10, 1651-1658.
- Weitere Literaturhinweise zum Problemkreis Niederwasser-
vorhersage:
- DYCK, S. (1978): Angewandte Hydrologie. Teil 1 und 2; Verlag Willhelm Ernst u. Sohn, Berlin-München.
- KRAUSNEKER, P. (1975): Extremwerte. Trockenwetter-Niedrigwasser. Wiener Mitt., Bd.18, E1-27, Wien.
- MULL, R. (1986): Low flow sustained by groundwater. In: River flow modelling and forecasting. (eds.) D.A. Kraijenhoff and J.R.Moll, 67-97. D.Reidel Publ. Company.
- PRELLBERG, D. (1977): Beitrag zur Ermittlung von Niedrigwasserperioden. Leichtweiss Institut f. Wasserbau, TU Braunschweig, Mitt. H.57.
- RIGGS, H.C. and R.L. Hanson (1969): Seasonal low-flow forecasting. In: Hydrological forecasting, WMO/UNESCO, WMO Technical Note No.92, WMO-No.228, T.P.122, 286-299.

Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie

Bisher sind erschienen:

1. J. HUG und A. BEILIK. Die Grundwasserverhältnisse des Kantons Zürich, mit Karte der Grundwasserströme des Kantons Zürich. Herausgegeben gemeinsam mit der Baudirektion des Kantons Zürich. Mit XX + 328 Seiten, 146 Figuren und Karte 1:100 000. 1934 24.–
2. E. EUGSTER. Schneestudien im Oberwallis und ihre Anwendung auf den Lawinenverbau. Mit VIII + 84 Seiten, 42 Textfiguren und 7 Tafeln. 1938 6.–
3. H. BADER, R. HAEFELI, E. BUCHER, J. NEHER, O. ECKEL, Chr. THAMS mit einer Einführung von P. NIGGLI. Der Schnee und seine Metamorphose. Erste Ergebnisse und Anwendungen einer systematischen Untersuchung der alpinen Winterschneedecke, durchgeführt von der Station Weissfluhjoch-Davos der Schweiz. Lawinenforschungskommission. 1934–1938. Mit XXIII + 340 Seiten, 18 Tafeln, 154 Figuren, 18 Tabellen. 1939 vergriffen
4. O. LUETSCHG-LOETSCHER. Zum Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges.
I. Band, 1. Teil, Erste Abteilung, Kapitel 1–3 (Mitarbeiter *Rudolf Böhner*): Heutiger Stand der Niederschlagsforschung. Heutiger Stand der Abschlussforschung. Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluss. Mit Tabellenwerk: Ergebnisse der Niederschlagsforschungen. Mit VI + 60 Seiten. 9 Karten, 10 Textfiguren, 17 Tabellen. 1945 vergriffen
I. Band, 1. Teil, Zweite Abteilung (Kapitel 4, 5): Vorratsänderungen im Wasserhaushalt der Gletscher. Verhalten des verstossenen Obern Grindelwaldgletschers. Mit VII + 34 Seiten, 10 Tafeln, 21 Figuren und 6 Tabellen. 1944 8.–
I. Band, 1. Teil, Dritte Abteilung, Kapitel 6–8 (Mitarbeiter *Rudolf Böhner*): mit einem Beitrag von *Hans Burger*. Boden und Vegetation im Wasserhaushalt des Hochgebirges. Die Bedeutung des Schneetransportes durch den Wind. Die Bedeutung der Nebel-, Tau- und Reifbildungen. VIII + 68 Seiten, Textfiguren, 4 Fototafeln. 1949 10.–
I. Band, 2. Teil, Kapitel 9 (Mitarbeiter *Rudolf Böhner*): mit Beiträgen von *H. Huber*, *P. Huber*, *F. de Quervain*. Zur Hydrologie, Chemie und Geologie der winterlichen Gletscherabflüsse der Schweizer Alpen. VI + 121 Seiten, 26 Textfiguren, 6 Falztafeln. 1950 14.–
I. Band, 3. Teil, Kapitel 10 (Mitarbeiter: *Theophil Hauck*, *Rudolf Böhner*). Die Eis- und Schneeverhältnisse der Oberengadiner Seen, insbesondere des St. Moritzer Sees. Beitrag zur Gewässer- und Klimakunde des Oberengadins, 173 Seiten, 54 Textfiguren, 8 Tafeln. 1954 vergriffen
II. Band, 3. Teil (mit Beiträgen von *Rudolf Böhner* und *Walter Dietz*). Zur Hydrologie der Landschaft Davos. Mit XLIV + 490 Seiten, 2 Karten, 9 Tafeln, 146 Textfiguren, 173 Tabellen. 1944 60.–
III. Band, Forschungsgebiet Nr. 16, F. GYGAX. Niederschlag und Abfluss im Einzugsgebiet der Magliasina. 100 Seiten, zahlreiche Textfiguren und Tafeln. 1948 14.–
5. H. P. EUGSTER. Beitrag zur Gefügeanalyse des Schnees. 64 Seiten, 42 Textfiguren, 1 Falztafel, 1 Fototafel. 1952 12.–
6. EDWIN BUCHER. Beitrag zu den theoretischen Grundlagen des Lawinenverbau. Herausgegeben gemeinsam mit der Schweizerischen Schnee- und Lawinenforschungskommission. 113 Seiten, 67 Textfiguren. 1948 20.–
7. F. HOFER. Über die Energieverhältnisse des Brienzersees. 95 Seiten, 4 Textfiguren, 8 Tafeln, 3 Kunstdrucktafeln. 1952 14.–
8. E. HOECK. Der Einfluss der Strahlung und der Temperatur auf den Schmelzprozess der Schneedecke. 36 Seiten, 22 Tafeln, 22 Tabellen. 1952 14.–
9. P. NYDEGGER. Vergleichende limnologische Untersuchungen an sieben Schweizer Seen. 80 Seiten, 57 Figuren, 24 Tabellen. 1957 vergriffen
10. S. STEINEMANN. Experimentelle Untersuchungen zur Plastizität von Eis. 72 Seiten, 91 Textfiguren. 1958 20.–
11. M. REIST. Beiträge zur Morphologie und Hydrologie des Bavonatales. 65 Seiten, 44 Figuren.
G. HIRSBRUNNER. Beiträge zur Morphologie und Hydrologie der Rovana-Täler. 79 Seiten, 18 Figuren, 26 Fotografien. 1960 20.–

Fortsetzung auf der letzten Inhaltseite

12. V. BINGGELI. Zur Morphologie und Hydrologie der Valle del Lucomagno. 124 Seiten, 30 Tabellen, 64 Figuren, 9 Fototafeln. 1961 20.–
13. J. G. ZELLER. Morphologische Untersuchungen in den östlichen Seitentälern des Val Blenio. 111 Seiten, 64 Textfiguren, 2 Tafeln. 1984 20.–
14. M. NIKLAUS. Geomorphologische und limnologische Untersuchungen am Öschinensee. 116 Seiten, 26 Textfiguren, 1 Tafel. 1967 28.–
15. E. GRUETTER. Beiträge zur Morphologie und Hydrologie des Val Verzasca. 92 Seiten, 9 Karten, 36 Figuren, 27 Abbildungen, 33 Tabellen. 1967 28.–
16. P. NYDEGGER. Untersuchungen über Feinstofftransport in Flüssen und Seen, über Entstehung von Trübungshorizonten und zuflussbedingten Strömungen im Brienzersee und einigen Vergleichsseen. 92 Seiten, 58 Abbildungen, 6 Tafeln, 29 Tabellen. 1967 28.–
17. H. U. SCHWEIZER. Beiträge zur Hydrologie der Ajoie (Berner Jura). 1970 28.–
18. Chr. JAGGI. Hydrologische Untersuchungen in verschiedenen Tessiner Tälern. 1970 28.–
19. P. KASSER, Karin SCHRAM und J. C. THAMS. Die Strahlungsverhältnisse im Gebiet der Baye de Montreux. 1970 10.–
20. P. FÖHN. Methoden der Massenbilanzmessung bei grossen Schneehöhen untersucht im Firngebiet des Grossen Aletschgletschers. 1971 28.–
21. J. P. TRIPET. Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse. 1973 28.–
22. V. BINGGELI. Hydrologische Studien im zentralen schweizerischen Alpenvorland, insbesondere dem Gebiet der Langete. 1974 30.–
23. Ch. LEIBUNDGUT. Zum Wasserhaushalt des Oberaargaus und zur hydrologischen Bedeutung des landwirtschaftlichen Wiesenbewässerungssystems in Langenthal. 30.–
24. Die Rheinwasserstrasse. – Technische und wirtschaftliche Aspekte, hydrologische Aspekte, Abflussprognosen. 10.–
25. Die Verdunstung in der Schweiz. – Stand der Kenntnisse, Methoden, Anregungen zur weiteren Erforschung. 24.–
26. E. HOEHN. Hydrologische Untersuchungen im Gebiet westlich von Frick (Aargauer Tafeljura). 1979 30.–
27. A. WILDBERGER. Zur Hydrologie des Karstes im Rawil-Gebiet. 1981 30.–
28. Tracermethoden in der Hydrologie. – Tagungsbericht des 4. SUWT – Internationale Fachtagung über die Anwendung von Tracermethoden in der Hydrologie, Bern, 1981. Teil I und II 65.–
29. F. D. VUATAZ. Etude géochimique et géothermique des eaux thermales de la Suisse et de quelques régions limitrophes. 1982 38.–
30. J.-M. JAQUET, F. RAPIN, E. DAVAUD et J.-P. VERNET. Géochimique des sédiments du Léman. 1983 20.–
31. Der Niederschlag in der Schweiz. Bericht der Arbeitsgruppe Niederschlag der HK SNG, Zürich. 1985 40.–
32. U. BOSSHART. Einfluss der Stickstoffdüngung und der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsweise auf die Nitratauswaschung ins Grundwasser (am Beispiel Naturlabor Buechberg SH). 1985 25.–
33. Abschätzung der Abflüsse in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung. – Bericht zum Teilprojekt C des Nationalen Forschungsprogrammes Nr. 2 «Grundlegende Probleme des schweizerischen Wasserhaushaltes». 1986 55.–
34. Niederwasser: Bestimmung, Nutzung und Erhaltung. Hydrologietagung, ETH Zürich, 1989. 30.–