Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 68 (1976)
Heft: 5

Artikel: Abflussprognosen für die Wasserwirtschaft
Autor: Vischer, Daniel
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939289

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

3. Vorgehen

Zeitplan

Ein konkreter Zeitplan wird erst erstellt werden können, wenn die Gesuche eingegangen und bearbeitet sind.

Organisation des Programms

Die Gesuche werden von der Expertengruppe, nötigenfalls unter Beizug weiterer Fachleute, beurteilt und jene ausgewählt, die ein Erreichen der angestrebten Ziele erlauben. Im Falle von Ueberschneidungen werden die Abgrenzungen festgelegt. Während der Ausführungsphase verfolgt und koordiniert die Expertengruppe die Untersuchungen. Eine wichtige Aufgabe der Expertengruppe wird es sein, in der Schlussphase des Programms zusammen mit den Forschungsträgern die Resultate zusammenzufassen.

Erfassung potentieller Forschungsträger

Durch Ausschreibung werden die potentiellen Forschungsträger an Universitäts- und Hochschulinstituten, Annexanstalten sowie der eidgenössischen und kantonalen Verwaltungen aufgefordert, konkrete Forschungsgesuche einzureichen. Falls die eingegangenen Gesuche einzelne Bereiche des Forschungsprogramms nicht abdecken sollten, kann die Expertengruppe entsprechende Aufträge an geeignete Stellen erteilen.

4. Finanzrahmen

Nach Beschluss des Bundesrates vom 2. Juli 1975 sind für das vorliegende Nationale Forschungsprogramm im Bereich der Hydrologie insgesamt 5 Mio Franken vorgesehen. Eine allfällig notwendig werdende Erhöhung dieser Summe liegt in der Kompetenz des Bundesrates.

5. Möglichkeiten internationaler Zusammenarbeit

Eine internationale Zusammenarbeit oder eine Abstimmung mit ausländischen Forschungen in den dargestellten Bereichen des Nationalen Forschungsprogrammes ist u. a. auf folgenden Ebenen möglich:

— Im Rahmen der COST (europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlich-technischen Forschung) wird im Bereich der spezifisch-analytischen Bestimmung von organischen Wasserinhaltsstoffen gearbeitet.
— Internationales hydrologisches Programm (UNESCO).
— Programm MWO für operationelle Hydrologie.
— Internationale Assoziation für hydrologische Wissenschaften.
— Forschungen zur Ausarbeitung von Strömungs- und Mischungsmodellen wurden in den letzten Jahren vor allem an ozeanographischen Instituten vorgenommen.

Abflussprognosen für die Wasserwirtschaft

DK 551.482.2

Daniel Vischer

Es gibt verschiedene Verfahren, um den Abfluss in Flüssen und Bächen vorauszusagen. Als besonders leistungsfähig hat sich das Verfahren der linearen Regressionsanalyse erwiesen. Die nachstehenden Ausführungen wollen dieses Verfahren kurz darstellen und seine Möglichkeiten anhand von Prognosen aufzeigen, wie sie von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich (VAW) seit einiger Zeit ausgegeben werden. Der Verfasser stützt sich weitgehend auf die Angaben der verantwortlichen Mitarbeiter, insbesondere von H. Jensen. Hinsichtlich der Einzelheiten sei deshalb auf die entsprechende Literatur verwiesen (vgl. Literaturverzeichnis am Schluss).

1. Einsatz der linearen Regressionsanalyse für Prognosen

Die lineare Regressionsanalyse untersucht die Abhängigkeit einer Zielgrösse Y von einer oder mehreren Einflussgrössen X_i aufgrund von Messreihen dieser Einflussgrössen und unter der Annahme, dass diese Abhängigkeit in folgender Form dargestellt werden kann:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^{p} a_i X_i + \epsilon$$

Dabei bedeuten:

Y	die Zielgrösse; die abhängige Variable; der Regressand
X_i	die Einflussgrössen; die unabhängigen Variablen; die Regressoren
a_0, a_i	die unbekannten Konstanten; die Regressionskoeffizienten
ϵ	den unbekannten Fehler; eine Zufallsgrösse mit dem Erwartungswert $E(\epsilon)=0$

Die Bezeichnung «lineare» Regressionsanalyse bezieht sich dabei auf die unbekannten Konstanten, also die Regressionskoeffizienten, und nicht etwa auf die bekannten Einflussgrössen. Letztere können durchaus in einer nichtlinearen Beziehung zu gegebenen Messwerten stehen, etwa in der Form

$$X_1 = F_i(z_1, z_2, \ldots)$$

Dabei bedeuten:

F_i	irgendeine Funktion
z_j	Messgrössen $(1 \leq j \leq m)$

Die Fragen, die von der linearen Regressionsanalyse im einzelnen behandelt werden, sind folgende:

— Schätzen der unbekannten Koeffizienten nach der Methode der kleinsten Quadrate
— Schätzen der Standardabweichung des Fehlers
— Angabe von Vertrauensintervallen für die Koeffizienten
— Testen von Hypothesen über die Koeffizienten
— Testen von Hypothesen über die Homogenität der Stichprobe
— Kontrolle des Ansatzes hinsichtlich der Linearität.

Die Abhängigkeit der Zielgrösse Y von einer oder mehrerer Einflussgrössen X_i wird also zuerst vorausgesetzt — das heisst als Regressionsansatz mit unbekannten Koeffizienten formuliert — dann werden die Koeffizienten errechnet. Das Ergebnis ist eine Regressionsgleichung, deren Zuverlässigkeit anhand verschiedener Tests überprüft und beschrieben wird.

Wenn es nun gelingt, eine Regressionsgleichung aufzustellen, die eine Zielgrösse Y für einen bestimmten Zeitpunkt mit Einflussgrössen verbindet, die zu einem früheren Zeitpunkt bekannt sind, so kann die Regressionsglei-

chung als Prognosegleichung verwendet werden. Die Ausgabe der Prognose beruht dann auf zwei Schritten:

1. Bestimmung der Einflussgrössen X_i
2. Berechnung der Zielgrösse Y aus der Prognosegleichung.

Dabei ist noch zu bemerken, dass die Prognose der Zielgrösse Y nicht in der Angabe eines einzelnen Wertes besteht, sondern in der Angabe dieses Wertes im Lichte seiner Wahrscheinlichkeit — oder allgemeiner gefasst — in der Angabe einer Wahrscheinlichkeitsverteilung W=W (Y).

Dementsprechend muss auch die Treffsicherheit einer Prognose beurteilt werden: Werden beispielsweise die Werte Y_{90} und Y_{10} angegeben, die mit 90 bzw. 10 % Wahrscheinlichkeit von Y unterschritten werden, so folgt, dass Y mit der Wahrscheinlichkeit 80 % innerhalb des Intervalles (Y_{90}, Y_{10}) liegen wird. Für praktische Zwecke kann man definieren:

Y innerhalb (Y_{90}, Y_{10})	Treffer
Y ausserhalb (Y_{90}, Y_{10})	Niete

Bei einer Vielzahl von Prognosen muss dann voraussetzungsgemäss der Anteil der Treffer 80 % betragen. Die Trefferzahl sagt also nichts aus hinsichtlich der Prognosegüte, sondern lässt lediglich den Schluss zu, ob die Trefferhäufigkeit mit der vorgegebenen Trefferwahrscheinlichkeit übereinstimmt. Von einer hohen Prognosegüte kann hingegen gesprochen werden, wenn die Breite des Intervalls (Y_{90}, Y_{10}) gering — das heisst, die «Gabel» eng — ist.

2. Grundsätzliche Beispiele von Prognosegleichungen

Wenn Abflüsse in Flüssen und Bächen aufgrund einer Regressionsanalyse vorausgesagt werden sollen, so kann man sich vieler Einflussgrössen bedienen. Aus der Kenntnis der abflussbildenden Prozesse lässt sich unter den variablen Einflüssen grundsätzlich folgende Auswahl treffen: Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Wind, Sonneneinstrahlung, Niederschlag, Verdunstung, Versickerung, Schneedecke, Gletscherrückhalt, Bodenfeuchte, Grundwasserrückhalt, Seeretention, Abflüsse an anderen Orten. Diese Aufzählung ist weder genau noch vollständig. So könnten alle genannten Einflussgrössen noch nach verschiedenen Gesichtspunkten weiter aufgegliedert werden, beispielsweise die Schneedecke in Schneegrenze (Höhenlage), Schneefläche, Schneehöhe, Wassergehalt.

Alle diese hydrometeorologischen Einflussgrössen weisen einen ausgesprochenen Jahresgang auf und einige unter ihnen zusätzlich einen Tagesgang. Sie lassen sich mit sehr unterschiedlichem Erfolg messen. Beispielsweise kann eine örtliche Lufttemperatur mit guter Genauigkeit und kontinuierlich erfasst werden, während die Gebietsverdunstung in der Regel nicht zur Verfügung steht. Deshalb wird die Auswahl an grundsätzlichen Einflussgrössen gleichsam eingeschränkt auf eine Auswahl an verfügbaren Einflussgrössen.

Ein Regressionsansatz berücksichtigt jedoch nie alle verfügbaren Einflussgrössen, sondern nur die wesentlichsten. Eine Prognosegleichung ist ja nichts anderes als ein stochastisches Abflussmodell, das die tatsächlichen Abhängigkeiten näherungsweise erfasst. Und die Kunst des Modellierens besteht darin, im Modell nur diejenigen Einflussgrössen einzuführen, die das interessierende Phänomen vorherrschend beeinflussen.

Die Unterscheidung der Einflussgrössen in wesentliche und unwesentliche ist demzufolge auch in der Regressionsanalyse ein primäres Ziel. Dabei kann die Bedeutung einer einzelnen Einflussgrösse sehr stark von der Anwesenheit weiterer Einflussgrössen in der Gleichung abhängen. So ist es möglich, dass diese Bedeutung durch die Hinzunahme einer weiteren Variablen verstärkt oder abgeschwächt wird.

Langfristprognose

Unter langfristig kann man bei Prognosen einen bis mehrere Monate verstehen, unter kurzfristig einige Tage; als sehr kurzfristig würde man einige Stunden bezeichnen. Hier folgt ein grundsätzliches Beispiel für die Prognosegleichung einer Langfristprognose:

$$A_{April-Juli} = a_0 + a_1 N_{Okt-März} + a_2 A_{Okt-März} + a_3 W_{31.März} + a_4 J_{31.März} + \epsilon$$

Dabei bedeuten:

$A_{April-Juli}$	Abflusswasserfracht der 4 Monate April bis Juli
$N_{Okt-März}$	Niederschlagsmenge der vorangegangenen 6 Wintermonate
$A_{Okt-März}$	Abflusswasserfracht der vorangegangenen 6 Wintermonate
$W_{31.März}$	Wasseräquivalent der Schneedecke am 31. März
$J_{31.März}$	Speicherinhalt der Seen im Einzugsgebiet am 31. März

Bei solchen Regressionsansätzen zeigt sich, dass die Regressionskoeffizienten von der Jahreszeit abhängig sind. Im vorliegenden Beispiel werden sie für das Frühjahr ermittelt.

Kurzfristprognosen

Grundsätzliches Beispiel für die Prognosegleichung:

$$\log Q_2 = a_0 + a_1 \log Q_{-1} + a_2 N_{-1} + a_3 N^2_{-1} + a_4 N_{-1} T_{-1} + a_5 N_{-1} Q_{-1} + a_6 (\log Q_{-2} + \log Q_{-3}) + a_7 (N_1 + N_2) + \ldots$$

Dabei bedeuten:

Q_2	Tagesmittel des Abflusses im nächstfolgenden Tag (Tag nach dem Ausgabetag)
Q_{-1}, Q_{-2}	Tagesmittel des Abflusses in den beiden Vortagen
N_{-1}, N_1, N_2	Niederschlagshöhe am Vortag, am Ausgabetag und am nächstfolgenden Tag
T_{-1}	Tagesmittel der Temperatur am Vortag

Hier zeigt sich besonders deutlich, dass die Regressionsansätze linear sind in den Koeffizienten, nicht notwendigerweise in den gemessenen Variablen. Funktionen mehrerer gemessener Variabler können dabei Variable vertreten, die nicht gemessen werden. So könnte das Produkt NT unter Umständen für den flüssigen Niederschlag oder für die Verdunstung stehen. Das Quadrat N^2 soll das raschere oberflächliche Abfliessen bei starkem Regen ausdrücken. Und das Produkt QN kann den Effektivregen vertreten, wenn man annimmt, dass der Abfluss mit der Bodenfeuchte korreliert ist und diese einen Gewichtsfaktor für den Einfluss des Niederschlages darstellt. Die Berücksichtigung von Einflussgrössen der Prognoseperiode, deren Wert zur Zeit der Prognosausgabe noch nicht bekannt ist, wie dies im Glied a_7 $(N_1 + N_2)$ geschieht, kann aus verschiedenen Gründen sinnvoll sein:

— wenn meteorologische Prognosen für diese Variablen vorhanden sind oder andere Gegebenheiten eine Schätzung zulassen

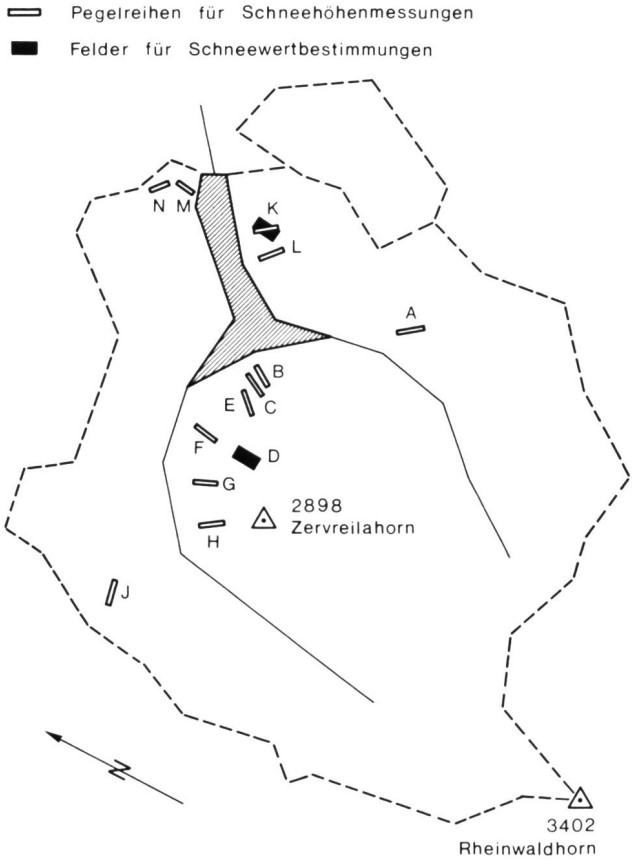

Bild 1 Stausee Zervreila und Einzugsgebiet. Lage der Messstellen für die Sommerzuflussprognosen.

— zur Nachkalkulation der Prognose am Ende der Prognoseperiode bei Fehlprognosen: Es kann dann die Frage entschieden werden, ob Fehlprognosen auf extreme Werte dieser Variablen zurückzuführen sind oder auf einen ungeeigneten Ansatz.

Zur weiteren Veranschaulichung folgen drei Beispiele aus der Prognosetätigkeit der VAW im Rheineinzugsgebiet:

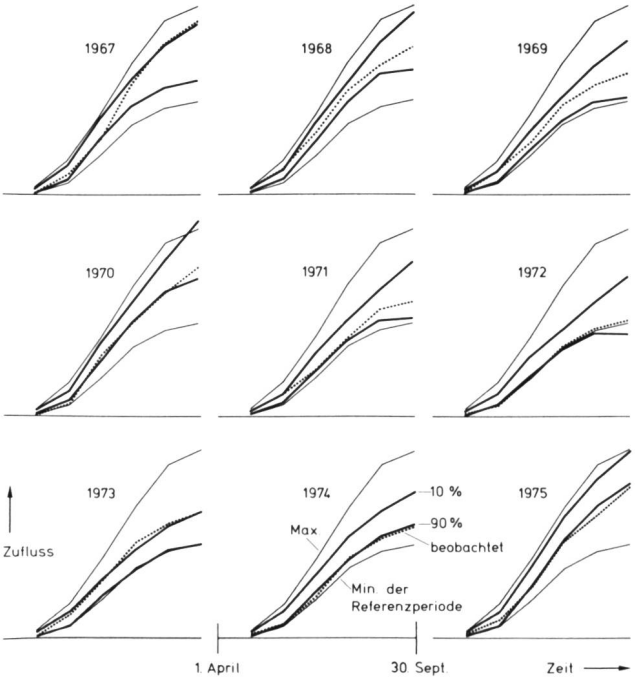

Bild 2 Stausee Zervreila. Sommerzuflussprognosen für die Jahre 1967 bis 1975. Vorhergesagte und beobachtete Werte sowie Extremwerte der Referenzperiode kumuliert ab 1. April.

3. Prognose für den Sommerzufluss zum Speichersee Zervreila

Der Speichersee Zervreila bildet das Kernstück der gleichnamigen Hochdruckanlage im Kanton Graubünden. Er wird wie alle umliegenden Speicherseen im Sommerhalbjahr gefüllt und im Winterhalbjahr geleert, um im schweizerischen Verbundnetz die Winterstromerzeugung sicherzustellen.

Das Stauziel des Speichersees liegt auf 1862 m ü.M., das Senkungsziel auf 1735 m ü.M., das zugehörige Nutzvolumen beträgt 100 Mio m³. Der natürliche Zufluss stammt zu einem grossen Teil aus dem direkten Einzugsgebiet von 63,9 km² Oberfläche und zu einem kleinen Teil aus einem indirekten — d.h. über einen Zuleitungsstollen angeschlossenen — Einzugsgebiet von 4,8 km². Das gesamte Einzugsgebiet liegt relativ hoch. Es erstreckt sich vom Stauziel bis zum Rheinwaldhorn auf 3402 m ü.M.; seine mittlere Höhe liegt um 2300 m ü.M. Das Einzugsgebiet ist zu 15 % vergletschert und im Winterhalbjahr tief verschneit. Dementsprechend erstaunt es nicht, dass vom Zufluss des Durchschnittsjahres von rund 97 Mio m³ nur 11 Mio m³ (11 %) auf das Winterhalbjahr entfallen und folglich 86 Mio m³ (89 %) auf das Sommerhalbjahr. Neben diesem direkten Zufluss steht dem Betrieb noch ein von tieferliegenden Einzugsgebieten hochgepumpter Zufluss von durchschnittlich 30 Mio m³ pro Sommerhalbjahr zur Verfügung.

Für den optimalen Betrieb des Speichers ist es nun interessant, den direkten Sommerzufluss zu kennen. Denn dieser soll derart genutzt werden, dass

— der Speicher bis zum Winterbeginn gefüllt wird, ohne dass der Hochwasserüberlauf anspringt (kein Ueberschusswasser)
— möglichst viel Spitzenenergie während der Sommerwerktagsstunden erzeugt werden kann (keine bzw. möglichst wenig Nacht- und Wochenendenergie)

Deshalb drängt sich eine Prognose des Sommerzuflusses auf. Eine solche wird von der VAW seit 1967 jeweils am 1. April aufgrund des Wasseräquivalentes der Schneedecke berechnet. Die heute verwendeten und aus einer Regressionsanalyse der Messwerte der Jahre 1959 bis 1974 gewonnenen Gleichungen lauten

$$Z_4 = c_4 + a_4 W_{31.\text{März}}$$
$$Z_{4-5} = c_{4-5} + a_{4-5} W_{31.\text{März}}$$
$$\vdots$$
$$Z_{4-9} = c_{4-9} + a_{4-9} W_{31.\text{März}}$$

Dabei bedeuten:

Z_4	Zufluss im Monat April, genauer der 50%-Wert
Z_{4-5}	Zufluss in der Periode April bis Mai
⋮	
Z_{4-9}	Zufluss in der Periode April bis September
$W_{31.\text{März}}$	Wasseräquivalent der Schneedecke am 31. März
c_{4-j}, a_{4-j}	Regressionskoeffizienten

Der Winterniederschlag ist als Einflussgrösse neben dem Wasseräquivalent der Schneedecke nicht signifikant und wurde deshalb nicht in die Prognosegleichung aufgenommen.

Die Karte in Bild 1 zeigt, wie die entsprechenden Messstellen im Einzugsgebiet verteilt sind. Es handelt sich um 13 Pegelreihen zur Erhebung der Schneehöhen Ende März und um 2 ausgewählte Orte für die Erhebung des Wasser-

äquivalents anhand von Abstichen und Wägung. Die Messungen werden vom Kraftwerkspersonal durchgeführt und der VAW übermittelt. Diese arbeitet die Prognose aus und stellt der Kraftwerksgesellschaft ein Bulletin zu, in welchem für das beginnende Sommerhalbjahr im wesentlichen die Angaben gemäss Bild 2 gemacht werden: In Form einer Summenkurve der Zuflüsse werden mit dicken Linien diejenigen Grenzen angegeben, die vom Zufluss mit 90 bzw. 10 % Wahrscheinlichkeit überschritten werden. Diese Grenzen schliessen das Vorhersageintervall ein, das mit 80 % Wahrscheinlichkeit den Zufluss enthalten wird. Zum Vergleich sind ausserdem die Extremwerte der Referenzperiode (Stichprobe) angegeben.

Der Vergleich mit der nachträglich in Bild 2 eingetragenen Summenkurve der gemessenen Zuflüsse zeigt eine gute Uebereinstimmung der Trefferhäufigkeit mit der vorgegebenen Trefferwahrscheinlichkeit.

4. Langfristprognosen für den Rheinabfluss in Rheinfelden

Rheinfelden liegt 20 km oberhalb Basel. Bei Basel verlässt der Rhein die Schweiz und fliesst durch Frankreich, Deutschland und die Niederlande zur Nordsee. Eine Prognose des Rheinabflusses in Rheinfelden stösst dementsprechend auf internationales Interesse. In der Tat wird sie auch von einer internationalen Arbeitsgruppe gefördert, die im Jahre 1954 ins Leben gerufen wurde und im wesentlichen drei Interessengruppen vertritt:

a) Die von den Kraftwerken Laufenburg und der Electricité de France (EdF) betriebenen Kraftwerke am Rhein. Die EdF beispielsweise betreibt von Kembs bis Gambsheim 9 Niederdruckanlagen mit einer installierten Leistung von insgesamt rund 1400 MW und insgesamt 42 Maschinengruppen. Zudem erstellt sie zur Zeit mit dem deutschen Badenwerk, mit dem sie bereits bei Gambsheim im Partnerschaftsverhältnis steht, eine zehnte Niederdruckanlage in Iffezheim von 100 MW Leistung in 4 Maschinengruppen. Für sie ist die Prognose der Rheinabflüsse in mehrfacher Hinsicht von Interesse: einmal möchte sie den Betrieb der ganzen Kraftwerkskette möglichst wirtschaftlich gestalten. Denn wenn sie weiss, welche Zuflüsse zu erwarten sind, so kann sie die Betriebsprogramme hinsichtlich der Bedürfnisse ihres grossen Versorgungsgebietes optimieren. Dann möchte die EdF auch die fälligen Revisionen der zahlreichen Maschinengruppen, Stauwehrschützen usw. derart planen, dass möglichst keine Energieeinbussen entstehen. Sie fragt also nach den Perioden, in denen der Rhein weniger Wasser bringt, als ihre Kraftwerke zu verarbeiten vermögen. Ferner ist die EdF als Bauherr, der seit drei Jahrzehnten fast ununterbrochen die Kraftwerkskette durch den Bau weiterer Niederdruckanlagen verlängert, an den Abflussverhältnissen längs der jeweiligen Baustellen interessiert.

b) Die Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz (BRD) baut die Prognosen für Rheinfelden in ein eigenes Vorhersagemodell ein, das noch in Entwicklung begriffen ist. Vor allem die an der Schiffahrt Interessierten möchten naturgemäss die schiffbaren Wasserstände voraussehen. Neben den höchstschiffbaren Wasserständen sind auch die Niederwasserstände bis zum niedrigsten schiffbaren Wasserstand von Bedeutung, weil sich dann die Frage nach dem Abladen der Schiffe stellt.

c) Die niederländische Wasserwirtschaft wird vertreten durch die Zuiderzeewerke und die Rijn Commissie. Für diese Wasserwirtschaft ist der Rhein der grösste Süsswasserzufluss; er ist gleichermassen wichtig für die Trink- und Brauchwasserversorgung wie für die Landwirtschaft. Beispielsweise ist der Sommerzufluss des Rheins für die Zuiderzeewerke eine entscheidende Grösse bei der Bewirtschaftung des Isselmeers. Um die Lage in den Niederlanden zu verstehen, sei daran erinnert, dass sich das Verhältnis zwischen Winter- und Sommerabflüssen längs des Rheins umkehrt. Am Hoch- und Oberrhein sind die Winterabflüsse geringer als die Sommerabflüsse. Am Niederrhein überwiegen dagegen die Winterabflüsse. Der Sommer bringt am Niederrhein und in den Niederlanden also eine Niederwasserzeit und ist darum für die wasserwirtschaftliche Nutzung begrenzend.

Zuhanden der Arbeitsgruppe werden dementsprechend seit 1954/55 Prognosen herausgegeben. Hier soll zunächst von den Langfristprognosen die Rede sein.

Doch bevor auf diese eingegangen wird, soll noch das Rheinregime kurz charakterisiert werden. Das Einzugsgebiet des Rheins in Rheinfelden umfasst 34 550 km², wovon 1,8 % von Gletschern und 3,6 % von Seen belegt sind. Die höchste Stelle des Einzugsgebietes liegt auf 4277 m ü.M., die tiefste auf 258 m ü.M., die mittlere Höhe beträgt 1085 m ü.M. Das Einzugsgebiet zerfällt grob gesehen in zwei Teile: die alpine Zone und die Zone des schweizerischen Mittellandes mit dem angrenzenden deutschen Gebiet. Die charakteristischen Abflusswerte sind: Mittlerer Jahresabfluss 1037 m³/s (Messperiode 1935 bis 1973), Höchsthochwasserabfluss 3710 m³/s (Spitze 22. Sept. 1968), Niedrigster Niederwasserabfluss 315 m³/s (Tagesmittel vom 2./3. Dez. 1962).

Die Langfristprognosen werden nun das ganze Jahr hindurch zu Beginn eines jeden Monats berechnet. Sie beziehen sich auf die Monatsmittel der nächstfolgenden 1 bis 2 Monate sowie vom 1. März an zusätzlich noch auf die anschliessenden Monate bis Ende September.

Heute lautet die Gleichung beispielsweise für die Prognose, die am 1. Juni herausgegeben wird, wie folgt:

$$\varphi(A_{\text{Juni, 50\%}}) = U_{50} = a_0 + a_1 J_{31.\text{Mai}} + a_2 W_{(1)31.\text{März}} + a_3 W_{(2)31.\text{März}} + a_4 W_{(3)31.\text{März}} + a_5 N_{\text{April–Mai}} + a_6 A_{\text{April–Mai}}$$

$$A_{\text{Juni, 50\%}} = \varphi^{-1}(U_{50})$$

$$A_{\text{Juni, 10\%}} = \varphi^{-1}(U_{50} + s_u t_{10})$$

$$A_{\text{Juni, 90\%}} = \varphi^{-1}(U_{50} - s_u t_{90})$$

Dabei bedeuten:

φ	eine für den Abfluss eingeführte Transformation, die die Standardabweichung des Vorhersagefehlers vom Vorhersagewert unabhängig macht (φ^{-1} bedeutet die Rücktransformation)
s_u	Standardabweichung des Fehlers
t_{10}	10%–Quantil der t-Verteilung (Studentverteilung)
$A_{\text{Juni, 50\%}}$	vorhergesagter 50%-Wert des natürlichen Abflusses im Juni (natürlicher Abfluss = beobachteter Abfluss + Inhaltsänderung der Stauseen)
$J_{31.\text{Mai}}$	Summe der Speicherinhalte der Seen im Einzugsgebiet am 31.Mai
$W_{(1)31.\text{März}}$	Wasseräquivalent der Schneedecke der höchstgelegenen Station (2540 m ü.M.) am 31.März
$W_{(2)31.\text{März}}$	Wasseräquivalent als Mittel von 4 ausgewählten Stationen
$W_{(3)31.\text{März}}$	Wasseräquivalent als Mittel von 7 weiteren Stationen
$N_{\text{April–Mai}}$	Niederschlagshöhe von 32 Stationen, April und Mai
$A_{\text{April–Mai}}$	natürlicher Abfluss des Rheins bei Rheinfelden, April und Mai

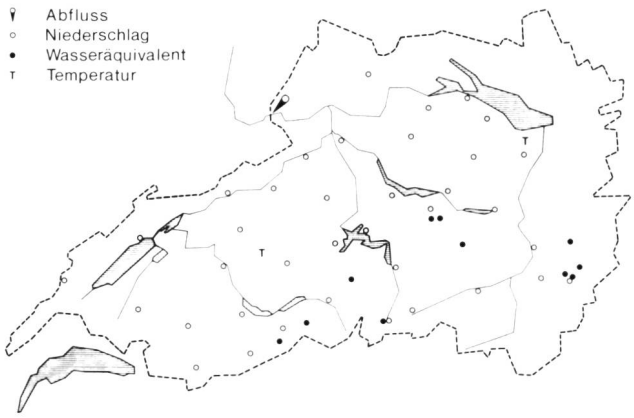

Bild 3 Einzugsgebiet des Rheins bei Rheinfelden. Lage der Messstellen für die Langfristprognosen.

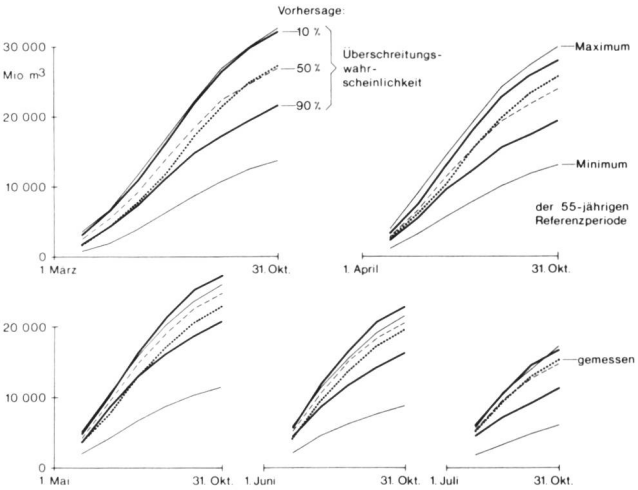

Bild 4 Rhein bei Rheinfelden, Sommerzuflussprognosen. Vorhergesagte und beobachtete Werte sowie Extremwerte der Referenzperiode kumuliert ab 1. März, 1. April, 1. Mai, 1. Juni und 1. Juli 1975.

Die berücksichtigten Messstationen sind in Bild 3 angegeben.

Beispiele solcher Prognosen sind in Bild 4 für den Sommer 1975 festgehalten und mit den anschliessend beobachteten Messwerten verglichen. Es zeigt sich in diesem schneereichen Jahr deutlich an der hohen und zutreffenden Prognose, dass eine starke Abhängigkeit des Sommerabflusses von den Reserven des Einzugsgebietes im Frühjahr die Ausgabe der Prognosen sinnvoll macht.

5. Kurzfristprognosen für den Rheinabfluss in Rheinfelden

Die Kurzfristprognosen für den Rheinabfluss werden ebenfalls im Rahmen der in Abschnitt 4 genannten Arbeitsgruppe herausgegeben. Für einzelne Interessenten — so die Schiffahrt — sind sie sogar wichtiger als die Langfristprognosen. Sie werden während der Wintermonate an drei Wochentagen, die im voraus festgesetzt sind, für zwei verschiedene Zielgrössen ermittelt: der mittlere Abfluss von drei Tagen in Form eines Dreitagemittels und die Folge von drei Tagesmitteln. Der Ausgabezeitpunkt ist für beide etwa 9 Uhr des ersten Tages.

Einen Einblick in die entsprechenden Gleichungen vermitteln die in Bild 5 veranschaulichten drei Beispiele:

Beispiel 1: Prognose in den Monaten März und April bei Schneeschmelze

Zielgrösse:

— Logarithmischer Wert des Dreitagemittels der Prognoseperiode (Ausgabetag, nächster und übernächster Tag)

Einflussgrössen:

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

Beispiel 2: Prognose bei fallendem Ast eines Hochwassers

Zielgrösse:

— Tagesmittel der Abflüsse der Prognoseperiode

Einflussgrössen:

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

Beispiel 3: Prognose in den Monaten Dezember bis Februar bei leichter Schneedecke im Mittelland

Zielgrösse:

— Logarithmischer Wert der Tagesmittel der Prognoseperiode

Einflussgrössen:

— Logarithmische Werte der Tagesmittel des Rheinabflusses in den drei Vortagen
— Flüssiger Niederschlag, Tageswerte der Vortage und vorausgesagte Tageswerte des Ausgabetages und des zweiten Tages (geschätzte Anteile am Gesamtniederschlag)

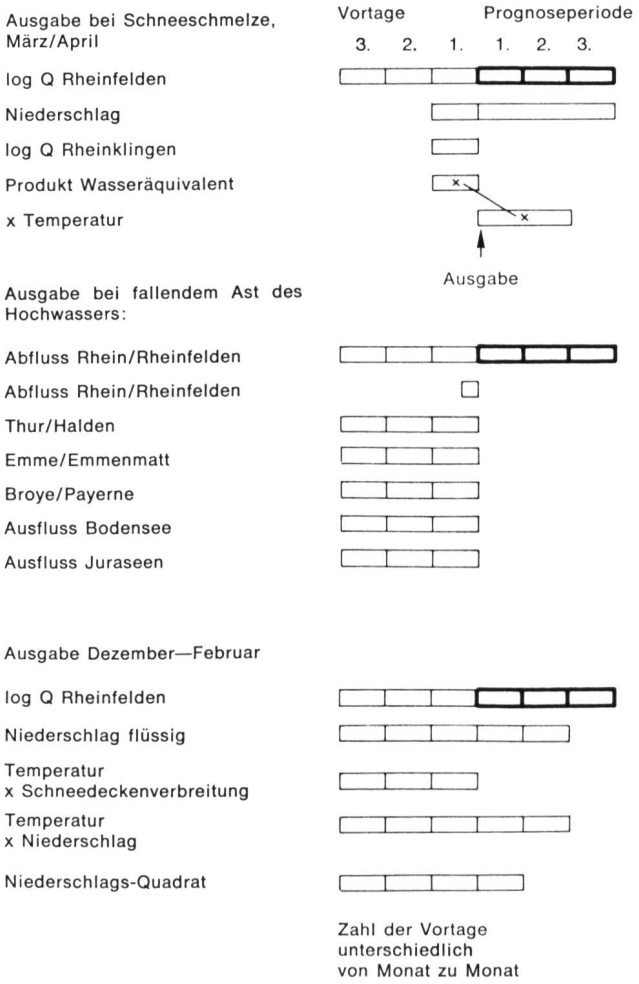

Bild 5 Rhein bei Rheinfelden. Kurzfristprognosen für den Abfluss. Schematische Darstellung der Prognosegleichung. Ausgabe bei Schneeschmelze März/April (oben), bei fallendem Ast des Hochwassers (Mitte), im Dezember bis Februar (unten).

— Produkt aus den Tagesmitteln der Lufttemperatur und der Ausbreitungsfläche der Schneedecke an den Vortagen (stellvertretend für das Schneeschmelzwasser)
— Produkt aus den Tagesmitteln der Lufttemperatur und der Tageswerte des Niederschlages an den Vortagen, dem Ausgabetag und dem ersten Tag (dadurch wird eine Verbesserung der Schätzung des flüssigen Anteils des Gesamtniederschlages angestrebt)
— Quadrat der Tageswerte des Niederschlages in den Vortagen und am Ausgabetag

Zur Illustration gibt Bild 6 eine Sequenz von Prognosen für den Februar 1970 im Vergleich zu den nachträglich gemessenen Abflüssen wieder.

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

Zur Zeit wird an einem neuen Modell gearbeitet, das dem Flussschema von Bild 7 entspricht. Als Eingangsgrössen dienen

— der Abfluss von 12 automatisierten Abflussstationen
— der Pegelstand und der Abfluss des Bodensees (automatisierte Stationen)
— der Niederschlag aus einer grösseren Zahl von Niederschlagsschreibern und Tagessammlern
— das Temperaturprofil
— die temporäre Schneegrenze
— das Wasseräquivalent der Schneedecke

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

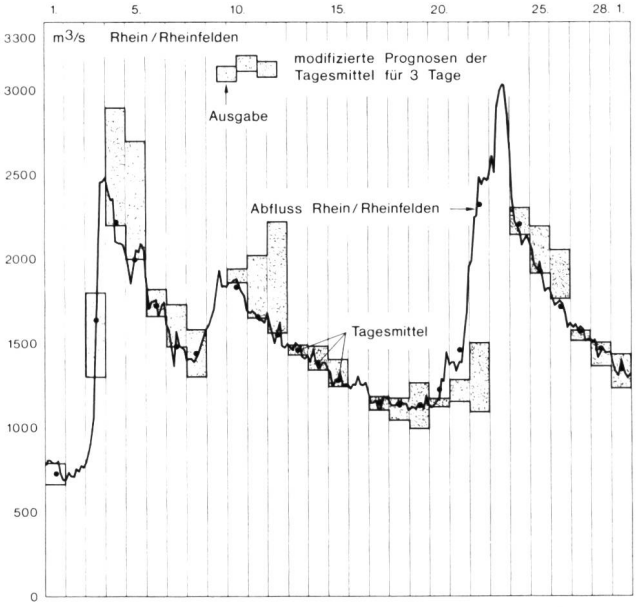

Bild 6 Rhein bei Rheinfelden. Kurzfristprognosen für den Abfluss. Vorhergesagte Tagesmittel des Ausgabetages und der beiden nächstfolgenden Tage (unterer Wert mit 90 %, oberer mit 10 % Ueberschreitungswahrscheinlichkeit), im Vergleich zu den beobachteten Werten. Abflussganglinie des Februars 1970.

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

Aus diesen und den anderen Eingangsgrössen werden nun die abgeleiteten Grössen ermittelt (Bild 7). So bestimmt

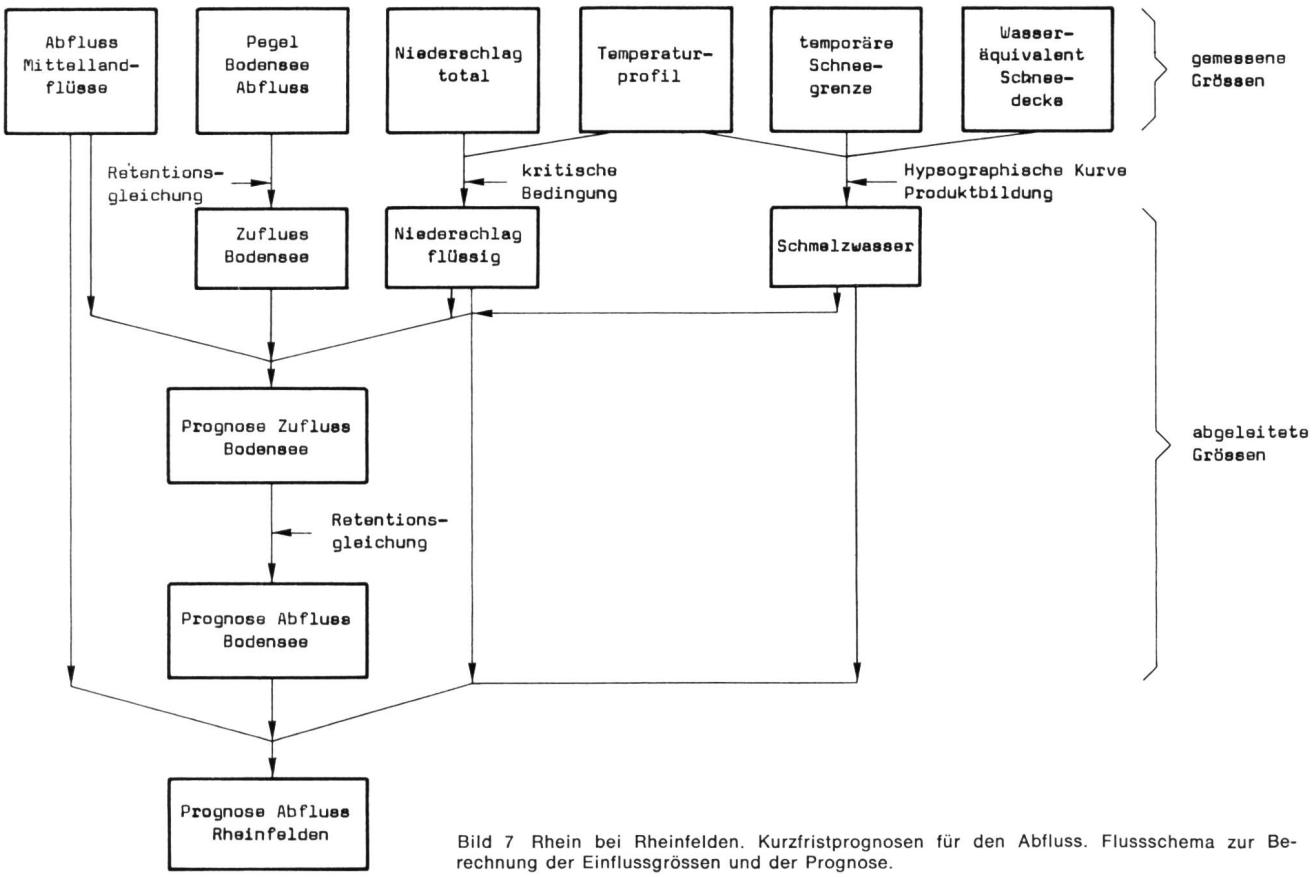

Bild 7 Rhein bei Rheinfelden. Kurzfristprognosen für den Abfluss. Flussschema zur Berechnung der Einflussgrössen und der Prognose.

sich der Zufluss der Vorperiode zum Bodensee anhand der Retentionsgleichung rückwärts aus dem Pegelstand und dem Abfluss des Bodensees. Der Niederschlag, der unmittelbar nur in seiner flüssigen Form interessiert, wird aus dem Gesamtniederschlag abgespalten; und zwar wird angenommen, dass derjenige Anteil, der bei einer Temperatur von 1 °C und mehr fällt, flüssig ist. Für das Schneeschmelzwasser wird eine repräsentative Grösse berechnet, die für jede Höhenlage im Einzugsgebiet — falls diese Höhenlage über der Schneegrenze liegt und eine positive Temperatur aufweist — im wesentlichen das Produkt aus Fläche mal Temperatur darstellt. Bei mehrtägigen Prognoseperioden wird auch das Wasseräquivalent der Schneedecke herangezogen.

Aus diesen abgeleiteten Grössen und gemessenen Abflüssen folgt zunächst eine Zuflussprognose zum Bodensee (Bild 7). Mit der bereits erwähnten Retentionsgleichung lässt sich diese in eine Abflussprognose des Bodensees transformieren, die ihrerseits zusammen mit einigen gemessenen und abgeleiteten Grössen zu der Abflussprognose des Rheins in Rheinfelden verarbeitet wird.
Dieses neue Modell für die Kurzfristprognose des Rheinabflusses in Rheinfelden berücksichtigt, dass die Alpenrandseen des Einzugsgebietes eine gewisse Zäsur bedeuten: Denn erstens kann das Temperaturprofil nur in den alpinen und voralpinen Regionen — also dort, wo markante Höhenunterschiede bestehen — bestimmt werden, und zweitens verunmöglichen die Seen wegen ihres nichtlinearen — sonst aber genau bekannten — Verhaltens eine Zusammenfassung der entsprechenden Einflussgrössen mit den übrigen, linear angenommenen Komponenten des Modells zu einem Gesamtmodell.

Das neue Modell soll nächstens in einer vorläufigen Form zur Anwendung gelangen. Parallel dazu sollen die Kurzfristprognosen aber noch in der bisherigen Form berechnet werden, so dass Vergleiche möglich werden.

Literaturverzeichnis

Hoeck E.: La prévision du débit estival de quelques rivières suisses par la méthode de corrélation à plusieurs variables. Tome III de l'Assemblée Générale de Bruxelles IUGG, 1951, p. 81—93, 1951.

Kasser P. und Schweizer W.: Voraussage der globalen Sommerabflussmenge der Rhône bei Porte du Scex auf Grund von Winterniederschlag und Winterabfluss. «Wasser- und Energiewirtschaft», Nr. 5-7, 1955, 4 S.

Kälin A.: Application de tests statistiques à la prévision d'apports globaux à l'aide de régressions. Tome III de l'Assemblée Générale de Toronto, IUGG, 1957, p. 50—66.

Lang H.: Relations between glacier runoff and meteorological factors observed on and outside the glacier. Commission of Snow and Ice, General Assembly of Berne, IUGG, 1967, p. 429—439.

Lugiez F., Kasser P., Jensen H. et Guillot P.: La prévision des débits du Rhin. «Bulletin AISH», XIV, 1—3, 1969, p. 91—116 et dans «La Houille Blanche», No. 7, 1969, p. 733—746.

Jensen H.: Hydrological Forecasting in Switzerland. Proceedings of the Regional Training Seminar on Methods of Hydrological Forecasting, Bratislava, 1968, Hydromet. Inst. of Czechoslovakia, p. 323—326.

Lang H.: Ueber den Abfluss vergletscherter Einzugsgebiete und seine Beziehung zu meteorologischen Faktoren. Mitteilungen der VAW, Nr. 85, 1970, 9 Seiten.

Lang H.: Ueber den Einfluss meteorologischer Faktoren auf den Schmelzwasserabfluss. «Annalen der Meteorologie», Neue Folge, Nr. 5, 1971, S. 213—214.

Kasser P.: Influence of Changes in the Glacierized Area on Summer Runoff in the Porte du Scex Drainage Basin of the Rhone. Symposium of the Hydrology of Glaciers, Cambridge, AISH, Publ. 95, 1973.

Lang H.: Variations in the relation between glacier discharge and meteorological elements. AISH Publ. No. 95, 1973.

Jensen H. und Lang H.: Forecasting discharge from a glaciated basin in the Swiss Alps. Proceedings of the Int. Symp. on the Role of Snow and Ice in Hydrology, Banff, Canada, Publ. AISH No. 107, 1973.

Naef F.: Zur Berechnung des Abflusses aus meteorologischen Grössen mittels mathematischer Modelle. «Schweizerische Bauzeitung», 92. Jg., H. 43, 1974.

Jensen H.: Anwendung der Regressionsanalyse. Hydrologische Prognosen für die Wasserwirtschaft. Mitteilung der VAW, Nr. 12, 1974, S. 137—164.

Lang H.: Die meteorologischen Faktoren und ihre Bedeutung für hydrologische Prognosen. Mitteilung der VAW Nr. 12, 1974, S. 67—94.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. Daniel L. Vischer, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), Gloriastrasse 37/39, CH-8006 Zürich.

Offene Fragen bei der Schätzung von Abflüssen aus kleinen Einzugsgebieten

Peter Widmoser

DK 551.482.2

1. Problemstellung

Ziel ist es, Verfahren von hinreichender Genauigkeit zur Schätzung von Abflusswerten aus kleinen Einzugsgebieten zu entwickeln. Dies entspricht der praktischen Forderung nach Abfluss-Bemessungswerten. Wirtschaftliche Betrachtungsweise verlangt zudem eine probabilistische Beschreibung des wechselnden Abflussgeschehens: die Bemessungswerte sind mit Häufigkeitsangaben zu bezeichnen.
Kleine Einzugsgebiete zeigen folgende Eigenheiten gegenüber grossen: ihr Hochwasserabfluss wird vorwiegend durch einzelne Regenereignisse, modifiziert durch die Regenvorgeschichte oder Schneeschmelze, bestimmt; physiographische Unterschiede wirken sich stärker aus; neben dem Gerinneabfluss spielt der Flächenabfluss eine bedeutende Rolle. Flächenmässig mag ihre obere Grenze bei etwa 100 km² liegen.
Derzeit sind in erster Linie Hochwasser-Abflussspitzen und -Wellen Gegenstand der Forschung. Von Interesse könnten auch sein: die Abflussvolumina, die Dauer von Hochwasserwellen, der Geschiebetrieb bei Hochwasser, die Häufigkeit von Niederwasser.

2. Kritische Betrachtung bestehender Forschungsmethoden

Diese beruhen auf Analysen von Abflussbeobachtungen oder der modellmässigen Beschreibung der Regen-Abflussbeziehung, welche wiederum Regenanalysen voraussetzt. Grob wird zwischen probabilistischen (statistisch/stochastisch) und deterministischen Methoden unterschieden. Zu beiden wurde eine Vielzahl von Modellen und Verfahren entwickelt. Die zwei Methoden können sich sinnvoll ergänzen, was noch gezeigt werden soll.

2.1 Probabilistische Methoden

Statistische Analysen von Abflussextremwerten verlangen langjährige Beobachtungsreihen. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Einzugsgebiete grösser als 50 km² innerhalb geographisch homogener Regionen zusammenfassen lassen. Das vorhandene Beobachtungsmaterial wird damit wirkungsvoller genutzt. Bei Gebieten kleiner als 50 km² überwiegen die spezifischen Gebietseinflüsse und sie sind gesondert zu untersuchen.
Passt man Beobachtungswerte an theoretische Verteilungsfunktion an, so erhält man Schätzwerte für statistische