

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 110 (1992)
Heft: 10

Artikel: Hochwasserabflüsse: zur Problematik der Abschätzung in der Schweiz
Autor: Spreafico, Manfred / Weingartner, Rolf
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-77872>

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: 06.07.2025

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

Hochwasserabflüsse

Zur Problematik der Abschätzung in der Schweiz

Fragen der Hochwasserbemessung spielen in der täglichen Praxis eine bedeutende Rolle. In der Schweiz wurden in den letzten Jahren verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse einer statistischen Analyse langjähriger Hochwassermessreihen und einer Eignungsprüfung des Unit-Hydrograph-Verfahrens vorgestellt.

Die aussergewöhnlichen Hochwasserereignisse des Jahres 1987, welche in der Schweiz Schäden von mehr als 1,2

VON MANFRED SPREADICO UND
ROLF WEINGARTNER,
BERN

Milliarden Fr. verursachten, provozierten in einer breiteren Öffentlichkeit Fragen nach dem Ausmass und der Häufigkeit von Hochwasserereignissen. Solche Fragen sind nicht neu; sie beschäftigen die Hydrologen schon seit Jahrzehnten [5]. Zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen dienen einerseits statistische Verfahren und andererseits die möglichst naturgetreue Modellierung hydrologischer Systeme und Prozesse. Bei der Methodenwahl sind die verfügbaren hydrologischen Informationen und die vorhandenen Kenntnisse über die physikalischen Vorgänge von grosser Bedeutung (Bild 1).

In diesem Artikel sollen nun aktuelle Hochwasseruntersuchungen auf dem Gebiet der Extremwertstatistik und der Black-Box-Modelle vorgestellt werden.

Auswertung von Hochwassermessreihen in der Schweiz

Die Schweiz verfügt im internationalen Vergleich über ein relativ dichtes, gut gewartetes Abflussmessnetz: im Mittel eine Abflussmessstation pro ca. 60 km² Fläche, mit grossen regionalen Unterschieden.

Die grosse Zahl der Stationen und die verhältnismässig lange Messdauer bei einzelnen Stationen lassen eine statistische Auswertung der Messreihen zur Hochwasserbeschreibung geradezu als ideal erscheinen. Seit 1984 analysiert die Landeshydrologie und -geologie (LHG) deshalb systematisch ihre Abflussmessreihen (Bild 2). In zwei ersten Bänden [3] sind die Resultate der Untersuchungen der langjährigen Reihen mit einer Messdauer von mehr als 30 Jahren zusammengefasst. LHG-Stationen mit

Messreihen zwischen 10 und 30 Messjahren sowie ausgesuchte kantonale Messstationen wurden in den letzten beiden Jahren ausgewertet, wobei Teile der Arbeiten auch im Rahmen des Programmes «Ursachenanalyse der Hochwasser 87» durchgeführt wurden.

Bei der Analyse standen folgende Ziele im Vordergrund:

- Kontrolle und Bereinigung der Hochwasserbeobachtungen;
- graphische Darstellung des Datenmaterials;

- Angaben zur Häufigkeit von Hochwassern;
- Analyse der Veränderungen der Hochwasserabflüsse im Laufe der Zeit;
- Abschätzung der anthropogenen Beeinflussung;
- Bereitstellung von Grundlagenmaterial, das zur Lösung von mannigfaltigen Problemstellungen verwendet werden kann.

Dazu wurden unter anderem die folgenden Arbeiten ausgeführt:

Sammlung und Aufbereitung der Beobachtungen

In einem ersten Schritt wurden für alle Stationen die wichtigsten Kenngrössen erhoben. Neben der Einzugsgebietsgrösse, der Beobachtungsperiode, den Messeinrichtungen und den Messmethoden wurden auch Informationen über die Gerinnestabilität im Messquerschnitt sowie über die höchste tatsächlich gemessene Fließgeschwindigkeit

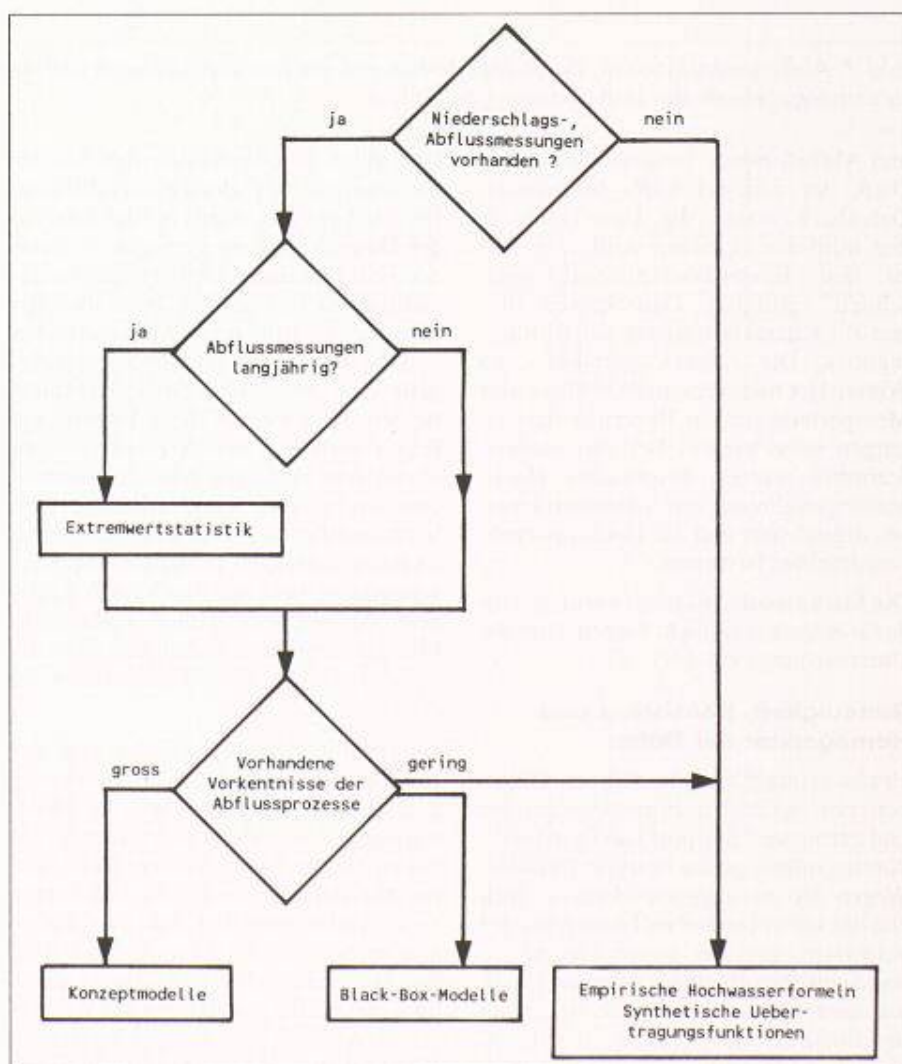


Bild 1. Verfahrensgruppen zur Hochwasserabschätzung (Labormodelle und hydraulische Verfahren nicht berücksichtigt)

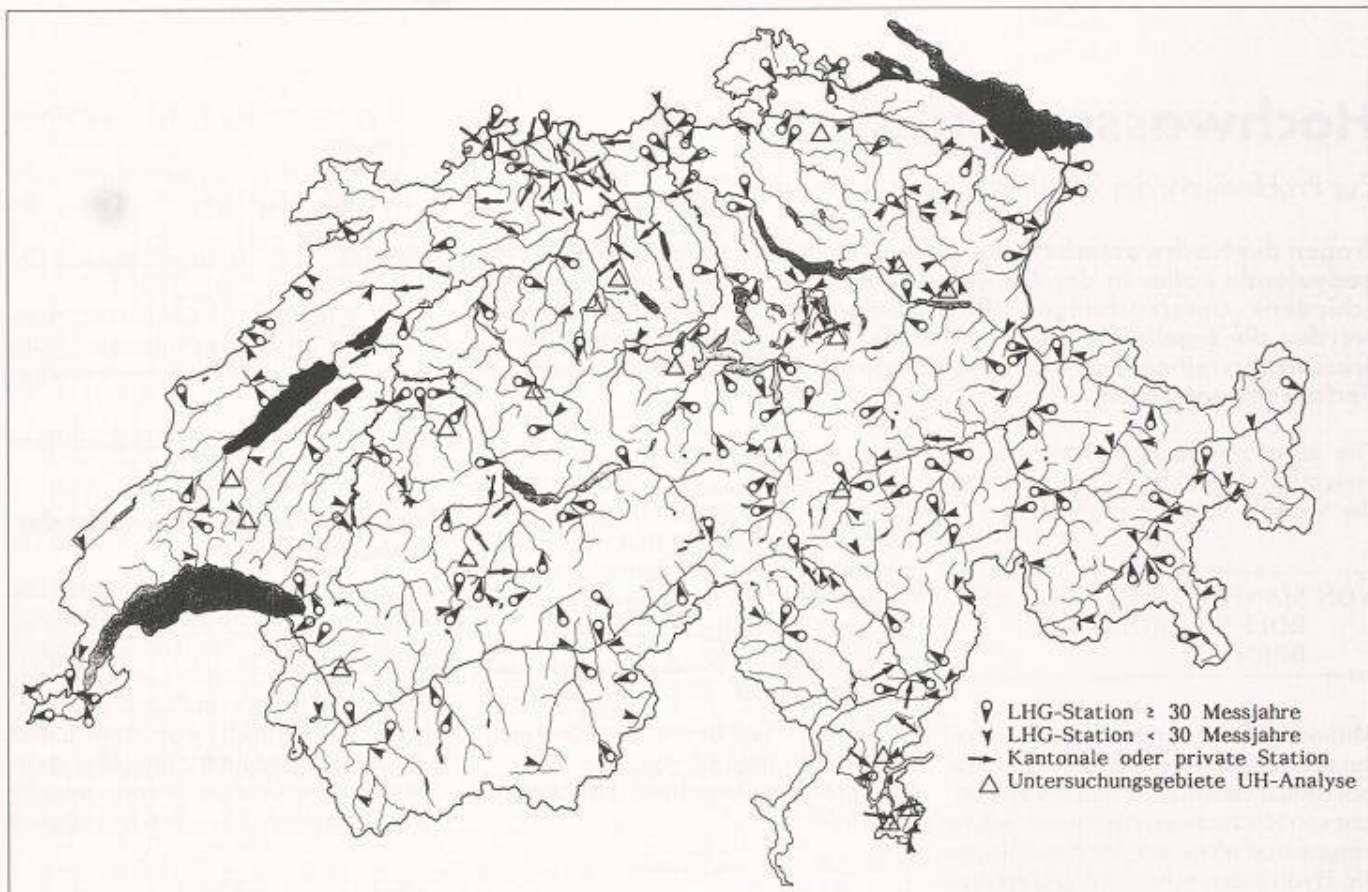


Bild 2. Abflussmessstationen, deren Messreihen von der Landeshydrologie und -geologie (LHG) analysiert wurden, sowie Untersuchungsgebiete der Unit-Hydrograph-Analyse

und Abflussmenge zusammengetragen. Dank der von der LHG betriebenen Datenbank waren die Unterlagen zu den mittleren täglichen Abflüssen und zu den Hochwasserspitzenabflüssen schnell verfügbar. Dauerkurven dienen zur Charakterisierung der Abflussregimes. Die Jahres-, Sommer- und Winter-Hochwasserspitzenabflüsse der Messperiode sind in Übersichtsdarstellungen ausgewiesen. Bei den meisten Stationen wurden ausgesuchte Hochwasserganglinien von Extremereignissen digitalisiert und die Hochwasserabflussfrachten bestimmt.

Die Starkniederschläge als verursachende Grössen waren nicht Gegenstand der Untersuchung (vgl. [6]).

Genauigkeit, Konsistenz und Homogenität der Daten

Hochwasserabflüsse in stabilen Gerinnen mit optimalen Fliessbedingungen und geringem Transport von Feststoffen können relativ genau bestimmt werden. Wegen der meist grossen Gefälle, welche die schweizerischen Fliessgewässer aufweisen, und der hohen Geschiebe- und Schwebstoffgehalte während Hochwasserereignissen, aber auch wegen der beschränkten Möglichkeit, mit flussbaulichen Massnahmen die Abflussmessung zu verbessern, sind diese optimalen Bedingungen nur selten anzutreffen.

Dies führt zu Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Hochwasserabflüsse. Diesem Umstand wurde bei der Analyse der Daten Rechnung getragen; er muss auch bei praktischen Anwendungen unbedingt beachtet werden. Trotz aller Anstrengungen, trotz neuer Messmethoden und bestmöglicher Extrapolationsmodelle bei den Wasserstands-Abfluss-Beziehungen werden diese Ungenauigkeiten auch in Zukunft nicht ganz zu eliminieren sein. Wie neueste Untersuchungen zeigen, kann allerdings ein Vertrauensbereich abgeschätzt werden. Exaktere Aussagen bezüglich der Spitzenabflüsse sind nur durch noch häufigere Messungen, weiter verbesserte Messmethoden und durch eine zusätzliche Ausrüstung der Messstationen zu erzielen.

Die Prüfung der Konsistenz und der Homogenität erwies sich als schwierig und zeitaufwendig, obschon die Messstationen bzw. Messreihen relativ gut dokumentiert sind. Naturgemäss sind bei Messreihen von bis zu 125 Jahren viele Änderungen bei den Messstationen selbst, bei der Messmethode und den Messgeräten, bei der Datenbearbeitung und bei der Aufstellung der Wasserstands-Abfluss-Beziehungen festzustellen. Als erstes galt es, den Einfluss dieser Änderungen abzuschätzen. Homogenitätsuntersuchungen wurden mit ver-

schiedenen statistischen Tests durchgeführt. Es zeigte sich bald die beschränkte Aussagefähigkeit solcher statistischer Tests. Nur bei starken Inhomogenitäten führten die Tests zu übereinstimmenden Ergebnissen. Es wurde deshalb zusätzlich versucht, aufgrund von Unterlagen über die Messstation und deren Einzugsgebiet Hinweise auf wesentliche anthropogene Eingriffe in den natürlichen Wasserhaushalt zu erhalten und diese wo möglich zu quantifizieren.

Aufgrund dieser Untersuchungen liessen sich die Stationen in drei Gruppen gliedern:

- Stationen mit grosser Beeinflussung des Hochwasserregimes,
- Stationen mit mittlerer Beeinflussung und schliesslich
- Stationen mit geringer bis keiner Beeinflussung.

Aufgrund einer ersten Sichtung der Ergebnisse der Trenduntersuchungen kann gesagt werden, dass allgemein keine systematischen Trends – etwa in Form einer generellen Erhöhung der Spitzenabflüsse – zu beobachten sind. Im Bild 3 sind einige Beispiele für die grössten beobachteten Jahres-, Sommer- und Winter-Hochwasserabflüsse dargestellt.

Die Spitzenwerte an der Station *Orbe-Le Chalet* zeigen ein charakteristisches

Bild: Erhebliche Schwankungen zwischen den Einzeljahren, aber kein langfristiger Trend.

Die Spitzenwerte der Station *Vispa-Visp* nehmen hingegen seit Beginn der sechziger Jahre ab. Dafür verantwortlich sind die Überleitungen aus dem Mattertal zum Lac des Dix und aus dem Saastal zum Stausee Mattmark. Solche Situationen sind im Alpenraum verschiedentlich anzutreffen. Dabei ist zu beachten, dass trotz dieser starken anthropogenen Nutzung bei speziellen Hochwassersituationen – beispielsweise bei vollen Speichern oder nach einer Schliessung der Ab- und Überleitungssysteme – Extremabflüsse auftreten können.

Bei der Station *Sitter-Bernhardzell* fällt die kontinuierliche Zunahme der Spitzenabflüsse auf, welche nicht mit künstlichen Eingriffen erklärt werden kann.

Statistische Analysen

Für die monatlichen Maxima der Hochwasser wurden der Mittelwert, die Standardabweichung, die Schiefe und der Variationskoeffizient ausgewiesen. Im weiteren wurden bei allen Stationen die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der jährlichen Höchstabflüsse berechnet. Als theoretische Verteilungsfunktionen eignen sich die Pearson III-, die log-Pearson III- und die Gamma III-Verteilung. Unsere Erfahrungen zeigen, dass bei der Bestimmung der 50- und 100-jährlichen Hochwasserabflüsse die Wahl der theoretischen Verteilungsfunktion bei relativ langen Beobachtungsreihen nicht von ausschlaggebender Bedeutung ist. Die Unsicherheiten durch Messfehler, durch unkorrekte Wasserstands-Abfluss-Beziehungen oder durch Inkonsistenzen und Inhomogenitäten können weit grösser sein.

In der Praxis sind solcherart berechnete Hochwasserabflüsse hoher Jährlichkeit mit Vorsicht anzuwenden. Bei diesem Verfahren wird nämlich vorausgesetzt, dass auch die seltensten Hochwasser zur gleichen Grundgesamtheit gehören wie die relativ kleinen Hochwasser. Wie sehr die Grösse des extrapolierten Wertes davon abhängt, ob in der Beobachtungsperiode bereits sehr hohe Abflüsse aufgetreten sind, ist in *Bild 4* dargestellt: Auf der Basis der Beobachtungsperiode 1911–1984 errechnet man bei der Station Reuss-Seedorf für ein 100jähriges Hochwasser einen Abflusswert von 586 m³/s. Wie die Graphik zeigt, werden auch die Messwerte hoher Jährlichkeit durch die Verteilungsfunktion gut angepasst. Bekanntlich trat im August 1987 ein Katastrophenhochwasser auf, dessen Abflussmenge die bisher gemessenen Höchstwerte bei weitem übertraf. Wird

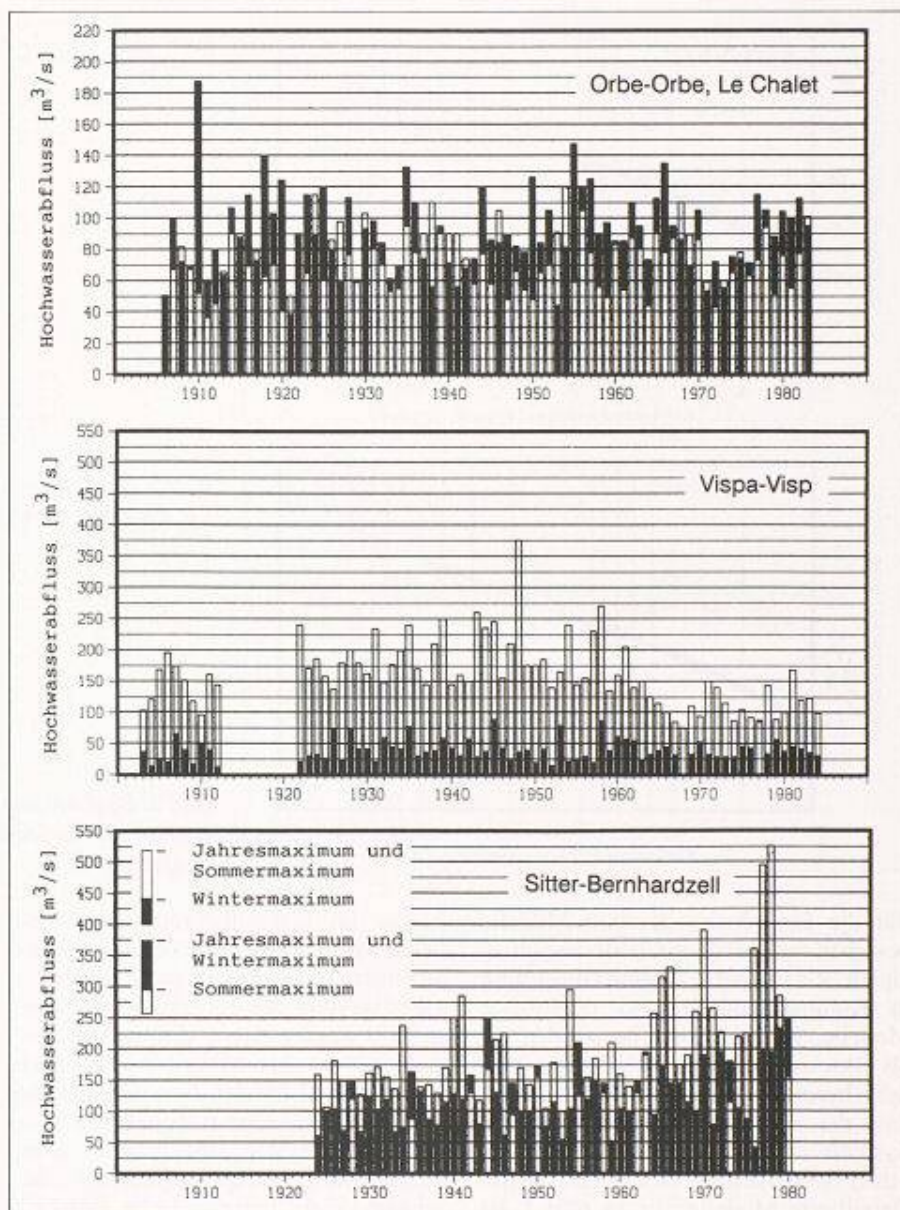


Bild 3. Die grössten beobachteten Jahres-, Sommer- und Winter-Hochwasserabflüsse an drei ausgewählten Stationen der LHG

das Jahr 1987 in die Beobachtungsperiode einbezogen, so erhält man mit 650 m³/s einen weitaus höheren 100jährlichen Hochwasserabflusswert. Auffällig ist nun, dass die Verteilungsfunktion den 1987er-Wert nur schlecht anzupassen vermag.

In *Bild 5* sind die maximalen spezifischen Abflussmengen der analysierten Stationen im Grosseinzugsgebiet der Rhone den Einzugsgebietsflächen gegenübergestellt. Auffallend ist die relativ enge Beziehung zwischen den beiden Grössen: Die maximalen spezifischen Spenden nehmen mit abnehmender Gebietsfläche zu.

Erkenntnisse bei der Anwendung des Unit-Hydrograph-Verfahrens

Die Übertragung des Niederschlags in den Abfluss ist ein grundlegender hydro-

drologischer Prozess, der im wesentlichen die beiden Teilprozesse Abflussbildung und Abflusskonzentration umfasst. In den letzten Jahren und Jahrzehnten sind zahlreiche Modelle entwickelt worden, die diese komplexen Prozesse abbilden und die es erlauben, Abflüsse aus Gebietsniederschlägen zu berechnen, insbesondere in Gebieten, in denen keine oder nur kurze Messreihen vorliegen.

Jedes N/A-Modell stellt eine Abstraktion der tatsächlich ablaufenden Prozesse dar; deshalb wird es immer Abweichungen zwischen den Modellergebnissen und den Naturmessungen geben. Das Ausmass der Abweichungen wird von vielen Rahmenbedingungen, vor allem aber von der Modellwahl und den damit zusammenhängenden Vereinfachungen (Linearisierung und Reduzierung) beeinflusst.

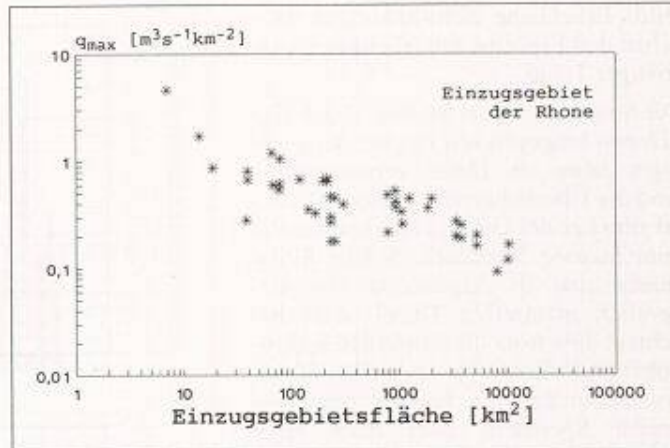
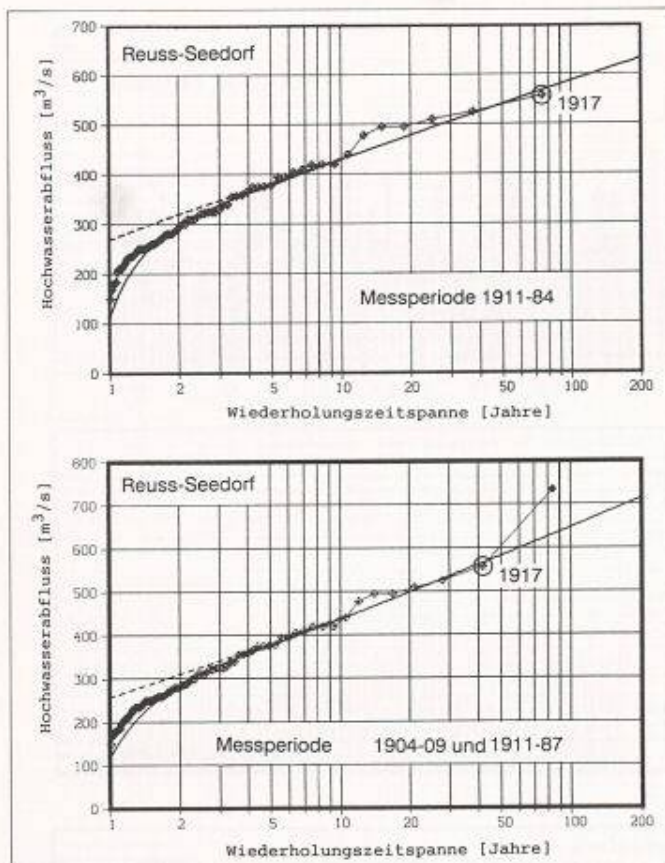


Bild 5. Maximale spezifische Abflussmengen in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgrösse

Bild 4. Bestimmung der Hochwasserwahrscheinlichkeit an der Station Reuss-Seedorf für zwei unterschiedliche Beobachtungsperioden

Für die Einordnung der N/A-Modelle bestehen verschiedene Gliederungsprinzipien. Recht häufig ist eine Gliederung in Kompaktmodelle und detaillierte Modelle. Kompaktmodelle werden oft als Blockmodelle oder Black-Box-Modelle bezeichnet. Wesentlich ist hierbei, dass die Wirkung des hydrologischen Systems durch einen einzigen empirischen Modellansatz beschrieben wird. Detaillierte Modelle, die in Bild 1 als Konzeptmodelle bezeichnet werden, erlauben es, die Individualität der Einzugsgebiete, d.h. die unterschiedlichen Systemeigenschaften und deren räumliche Verteilung, besser zu erfassen. Mit dem höheren Detaillierungsgrad ist aber ein beträchtlicher Mehraufwand verbunden. Durch die oft nur begrenzt zur Verfügung stehenden Daten stösst man schnell an die Grenzen des Machbaren.

Wesentlich bei der Modellbeurteilung ist die Frage, ob das Modell linear ist.

Linear im systemtheoretischen Sinne heisst, dass die Reaktion eines Systems auf mehrere Eingangssignale durch die Überlagerung der Einzelreaktionen ermittelt werden kann (Superpositionsprinzip). Ist das Modell zudem noch zeitinvariant, bedeutet dies, dass gleiche Funktionen, welche zu beliebigen Zeitpunkten ins System eingegeben werden, immer gleiche Ausgangsfunktionen bewirken. Viele hydrologische Prozesse weisen ein nichtlineares Verhalten auf. Trotzdem zeigte es sich immer wieder, dass auch lineare und zeitinvariante Modelle zu tauglichen Ergebnissen führen können.

Das Unit-Hydrograph-Verfahren

Im folgenden soll nun von den Erfahrungen berichtet werden, welche bei einer umfassenden Anwendung eines linearen, zeitinvarianten Kompaktmodells auf schweizerische Einzugsgebiete gewon-

nen wurden. Solche Modelle haben den Vorteil der einfachen Handhabung und eines relativ bescheidenen «data-handlings». Unsere Wahl fiel auf das Unit-Hydrograph-Modell als bewährtes, aber nicht unumstrittenes Verfahren. Bei diesem Modell wird das Einzugsgebiet im Sinne der Systemtheorie als «Black-Box» betrachtet, das heisst, dass die Systemreaktion vollständig durch die Systemerregung und die Charakteristik des Systems bestimmt wird. Zwischen der Systemerregung und der Systemantwort besteht eine Verknüpfung, die als Übertragungsfunktion bezeichnet wird. Wird der verursachende Effektivniederschlag (I_w) als Folge von Deltaimpulsen aufgefasst, so lässt sich der Direktabfluss (Q_D) bei Kenntnis des Instantaneous Unit Hydrograph (IHU) durch das Faltungsintegral (1) berechnen:

Vgl. Formel 1.

$$Q_D(t) = \int_0^t u(t-\tau) \cdot I_w(\tau) d\tau$$

mit

$Q_D(t)$: Direktabfluss
 $I_w(t)$: abflusswirksamer Niederschlag
 $u(t)$: Übertragungsfunktion
 τ : Integrationsvariable

Formel 1

$$Q_{Di} = \sum_{j=1}^m \Delta t \cdot (u_{i-j+1} \cdot I_{wj}) \quad \text{für } 0 < i-j+1 < n$$

mit

Q_{Di} : Ordinaten des Direktabflusses [m^3/s]
 Δt : Zeitschritt [h]
 u : Ordinaten des Unit Hydrographen [$m^3/(s \cdot mm)$], mit $u_0=0$; $u_n=0$
 I_w : abflusswirksamer Niederschlag [mm/h]
 m : Anzahl Niederschlagsintervalle ($j=1,2,\dots,m$)
 n : Anzahl Ordinaten des Unit Hydrographen
 i : Laufindex des Direktabflusses

Formel 2

Im diskreten Fall, bei dem der Niederschlag durch Rechtecksimpulse beschrieben wird, führt das Faltungsintegral auf ein lineares Gleichungssystem (2):

Vgl. Formel 2.

Danach lässt sich jede Abflusswelle des Direktabflusses als Superposition von Einzelwellen denken, die je aus einem Intervall des abflusswirksamen Niederschlags entstanden sind und deren Ordinaten sich durch die Multiplikation der Unit-Hydrograph-Ordinaten mit der Grösse des abflusswirksamen Niederschlags dieses Intervalls ergeben. Im Analysefall werden die Ordinaten des Unit Hydrographen von der beobachteten Hochwasserwelle und den gemessenen Niederschlägen hergeleitet. Dazu muss das überbestimmte Gleichungssystem (2) gelöst werden.

Ziel der hier vorgestellten Eignungsprüfung ist es, über die Analyse möglichst vieler sorgfältig ausgewählter N/A-Ereignisse Grundlagen für eine optimale Anwendung des Unit-Hydrograph-Ansatzes zur Hochwasserbemessung zu erarbeiten. Dazu müssen auch die variablen und invariablen Eigenschaften eines Einzugsgebietes, die Rahmenparameter also, unter denen ein Ereignis abläuft, erfasst werden.

Diese Arbeiten wurden – mit finanzieller Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds-von der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern in Zusammenarbeit mit der Landeshydrologie und -geologie durchgeführt.

Analyse ausgewählter Niederschlag/Abfluss-Ereignisse

Die Analyse ist an Einzugsgebiete mit gut dokumentierten und zeitlich hochauflösenden Niederschlags- und Abflussmessungen gebunden. Eine Einzugsgebietsgrösse zwischen 5 und 250 km² bietet für eine gewisse räumliche Homogenität Gewähr. Auch darf angenommen werden, dass solche Gebiete noch annähernd einheitlich überregnet werden. In der gesamten Schweiz wurden schliesslich siebzehn Untersuchungsgebiete ausgeschieden, welche Messreihen von mindestens zwei Jahren aufweisen. Sie repräsentieren das hydrologische Spektrum der Schweiz gut (Bild 2).

Bei der Auswahl der zu analysierenden N/A-Ereignisse wurden vor allem eingipflige Hochwasserereignisse berücksichtigt. Wenn man bedenkt, dass oft gerade mehrgipflige Ereignisse zu den grössten Spitzenabflüssen führen, so bildet diese Auswahl doch eine gewisse Einschränkung. Insgesamt standen

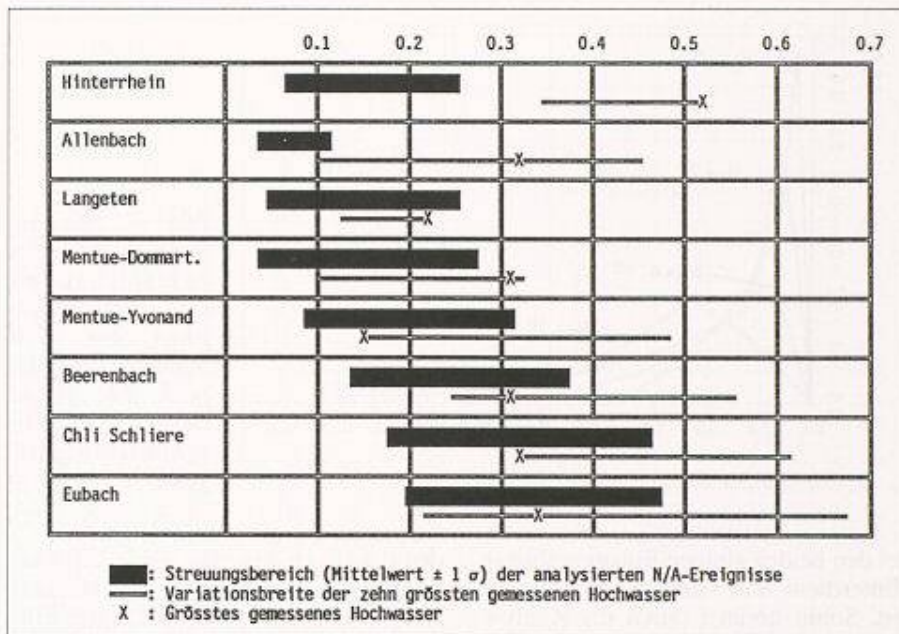


Bild 6. Streuung der Abflussbeiwerte

schliesslich in den siebzehn Untersuchungsgebieten über 350 Ereignisse für eine weitergehende Analyse zur Verfügung.

Analyse der Abflussbeiwerte:

Zur Bestimmung des Direktabflusses wählen wir eine lineare Abtrennung des Basisabflusses. Die Abflussbeiwerte wurden über das Direktabflussvolumen im Vergleich mit dem Gesamtniederschlag berechnet. Sie streuen erwartungsgemäss sowohl zwischen den Hochwasserereignissen innerhalb eines Gebietes als auch zwischen den Gebieten (Bild 6).

Korrelationsanalysen zeigten eine geringe Sensitivität des Abflussbeiwertes auf Schwankungen beim Gesamtniederschlag, bei der Niederschlagsdauer und -intensität und bei anderen Parametern wie etwa der Vorregensumme (vgl. Tabelle 1).

Aus der Sicht der nordalpinen Einzugsgebiete lassen sich die Medianwerte der Abflussbeiwerte (α_{med}) räumlich wie folgt einordnen:

- mittlere Einzugsgebietshöhe < 1000 m: $0.1 < \alpha_{med} \leq 0.2$
- mittlere Einzugsgebietshöhe 1000–1500 m: $0.2 < \alpha_{med} \leq 0.4$
- mittlere Einzugsgebietshöhe > 1500 m: $\alpha_{med} \leq 0.16$

Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Medianwerte wegen der grossen Variationsbreite eine nur beschränkte Repräsentativität aufweisen.

Aufschlussreich ist der Vergleich zwischen den Abflussbeiwerten von Hochwasserereignissen kleinerer Jährlichkeit (<10 Jahre) mit den Abflussbeiwerten der zehn grössten beobachteten Hochwasser (Bild 6). Die Abflussbeiwerte der extremen Hochwasser heben sich in den wenigsten Fällen von den anderen Abflussbeiwerten ab. Eine Ausnahme ist

Korrelationsanalyse Cassarate – Pregassona

$n = 15$, $r_{krit.}$ ($\alpha=5\%$) = 0.51

Parameterliste: Parameter des Unit Hydrographen (u_{max} , t_a , t_d [s, Text]), Abflussbeiwert (α), Vorregenparameter (VN_5 , VN_{21} maximale und mittlere Niederschlagsintensität (I_{max} , I_{mit}), Niederschlagsdauer (N_D), gesamter und effektiver Niederschlag (N_g , N_{eff})

Signifikante Korrelationen

(t_a, u_{max})	: -0.54	(N_D, N_g)	: 0.57
(t_d, u_{max})	: -0.78	(N_g, N_{eff})	: 0.72
(N_D, u_{max})	: -0.59	(I_{max}, I_{mit})	: 0.89
(N_D, t_a)	: 0.76	(I_{mit}, u_{max})	: 0.57
(N_D, t_d)	: 0.59	(I_{mit}, t_a)	: -0.52
(N_D, I_{max})	: -0.52	(VN_5, VN_{21})	: 0.70

Tabelle 1. Signifikante korrelative Zusammenhänge zwischen Parametern des Unit Hydrographen und Ereignisparametern bei der Cassarate in Pregassona

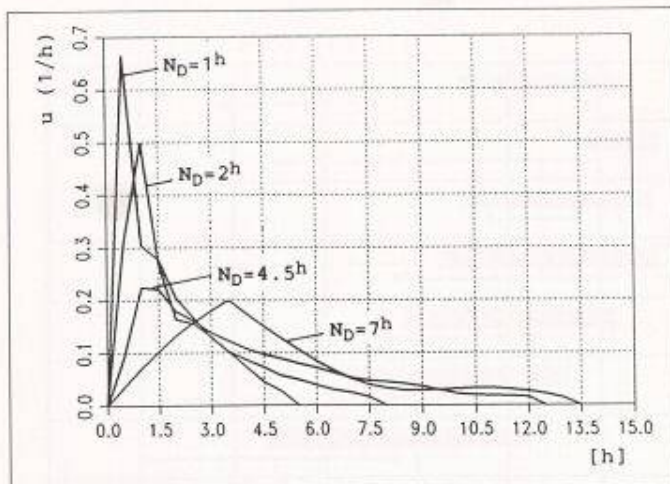


Bild 7. Schwankungen der charakteristischen Unit Hydrographen der Chli Schliere in Alp-nach (N_D : Dauer des Niederschlagsereignisses)

bei den beiden alpinen Einzugsgebieten Hinterrhein und Allenbach festzustellen. Somit können durch die Analyse von Hochwasserereignissen kleinerer Jährlichkeit Erfahrungswerte für Hochwasser grösserer Jährlichkeit bereitgestellt werden. Diese Erfahrungswerte sind aber wegen der festgestellten Variationen der Abflussbeiwerte nur als erste Annäherung zu verstehen.

Die Vorgeschichte eines Ereignisses:

Als Indikatoren der Bodenfeuchtebedingungen zu Beginn eines N/A-Ereignisses werden oft Vorregensummen wie VN_5 und Vorregenindizes wie VN_{21} berechnet (vgl. [4]).

Aufgrund unserer Untersuchungen kann festgehalten werden, dass sich diese Indikatoren nicht eignen, die Anfangsbedingungen eines N/A-Ereignisses zufriedenstellend zu charakterisieren. Insbesondere ist die Sensitivität der Parameter eines Hochwasserereignisses auf Variationen bei den Vorregenparametern gering. Wir vermuten, dass dafür nicht zuletzt die grosse Neigung unserer Untersuchungsgebiete verantwortlich ist. Im Mittel weisen rund 60% der Untersuchungsgebietsflächen Hangneigungen $>15\%$ auf. Nach einem Niederschlagsereignis wird vermutlich eine schnelle Drainage der hochwasserrelevanten Flächen erfolgen. Ein Indikator, der auf den Zeitraum der letzten 24 bis 48 Stunden vor Ereignisbeginn ausgerichtet ist, scheint uns demnach erfolgversprechender zu sein [4].

Ermittlung eines repräsentativen Unit Hydrographen

Ereignisabhängigkeit der Unit Hydrographen:

Über die Lösung des Gleichungssystems (2) wurde für jedes N/A-Ereignis der Unit Hydrograph berechnet. Im Vergleich der Unit Hydrographen eines Gebietes fällt deren grosse Streuung auf (Bild 7). Aufgrund der Erfahrungen an-

derer Autoren konnten diese Schwankungen zwar erwartet werden, erstaunlich ist aber ihr Ausmass. Da der Einfluss fehlerhafter Messwerte infolge der sorgfältigen Datenauswahl weitgehend ausgeschlossen werden kann, rückt die Frage nach der Ereignisabhängigkeit der Unit Hydrographen in den Mittelpunkt des Interesses. Diese wurde bereits in anderen Arbeiten diskutiert und grundsätzlich anerkannt.

Zur Abklärung der Ereignisabhängigkeit eignet sich eine Korrelationsanalyse, bei der die Parameter des Unit Hydrographen (Scheitelanstiegszeit $[t_s]$, maximale Ordinate $[u_{max}]$, Basislänge $[t_d]$) den Ereignisparametern gegenübergestellt werden. Die Tabelle 1 hält am Beispiel der Cassarate-Pregassona ein typisches Ergebnis fest. Es zeigt sich dabei die Bedeutung der Niederschlagsdauer. Aufgrund der Vorzeichen der signifikanten Korrelationskoeffizienten kann gesagt werden, dass sich die Unit Hydrographen mit zunehmender Dauer der Niederschläge verflachen und verlängern (vgl. Bild 7). Solche signifikanten Zusammenhänge konnten in zehn der siebenzehn Untersuchungsgebiete festgestellt werden. Tendenziell lässt sich die Verflachung der Unit Hydrographen bei zunehmender Niederschlagsdauer auch in den restlichen Untersuchungsgebieten beobachten.

Weitere signifikante Korrelationen zu den Unit-Hydrograph-Parametern wurden – wenn auch bei einer geringeren Zahl von Gebieten – bei der Niederschlagsmenge und -intensität gefunden.

Insgesamt lassen sich die Unit Hydrographen eines Gebietes über die Niederschlagsdauer gliedern. Es liegt aber in der Natur der N/A-Ereignisse begründet, dass damit nicht die gesamte Streuung der Unit Hydrographen erklärt werden kann. In der Publikation [1], in der die wichtigsten Daten dieser Ereignisprüfung aufbereitet sind, werden die Unit Hydrographen aufgrund dieser

Ergebnisse nach der Niederschlagsdauer geordnet.

Die Form eines Unit Hydrographen zeigt, wie die einzelnen Rechtecksimpulse des Niederschlags im Mittel auf den Abfluss übertragen werden. Schnell und steil ansteigende, also markante Unit Hydrographen, wie sie in der Regel bei kurzer Niederschlagsdauer auftreten, sprechen für eine schnelle Übertragung des Niederschlags in den Abfluss. Eine verzögerte Übertragung ist hingegen bei den weniger ausgeprägten, langen, also runderen Unit Hydrographen zu erwarten.

Unser Interpretationsversuch dieser notabene statistisch ermittelten Ergebnisse in Bild 8 lehnt sich stark an das Konzept der beitragenden Fläche an, das von [2] für die Schweiz weiterentwickelt wurde. Es fusst auf der Beobachtung, dass nur die vorfluternahen Flächen eines Einzugsgebietes hochwasserrelevant sind. Da für sämtliche Abflussvorgänge Anfangsfeuchtedefizite zu decken sind, wird der Abfluss von Flächen am Hangfuss, bei denen die Defizite am geringsten sind, beginnen. Bei einer nur kurzen Niederschlagsdauer bleibt die Abflussbildung auf diese gerinnenahen Flächen beschränkt, weil die Niederschlagsdauer und die Niederschlagsmengen nicht ausreichen, um die Feuchtedefizite in den entfernteren Hangpartien zu decken. Insgesamt erfolgt die Übertragung des Niederschlags in den Abfluss ohne grosse Verzögerung; es resultiert der oben beschriebene markante Unit Hydrograph.

Mit zunehmender Dauer des Niederschlags nimmt der Sättigungsgrad der hangaufwärts gelegenen Böden allmählich zu. Der Niederschlag gelangt aber aus diesen Hangpartien erst zum Abfluss, wenn die Feuchtedefizite gedeckt sind. Diese Retentionseffekte führen zu einer gedämpften und verzögerten Umsetzung des Niederschlags in den Abfluss und haben ein rundliches Gepräge der Unit Hydrographen zur Folge.

Bestimmung des repräsentativen Unit Hydrographen:

Wegen dieser Ereignisabhängigkeit weisen die aus N/A-Ereignissen abgeleiteten Unit Hydrographen nur eine geringe Allgemeingültigkeit auf. Es stellt sich deshalb die Frage, wie man zu einem für die praktische Anwendung geeigneten, also repräsentativen Unit Hydrographen gelangt. Repräsentative Unit Hydrographen sind auch notwendig, wenn die Unit Hydrographen über den Vergleich der als Determinanten betrachteten Gebietskenngrößen regionalisiert werden sollen. Vielfach wird ein repräsentativer Unit Hydrograph durch die Mittelung

der Unit Hydrographen eines Gebietes bestimmt.

Bei der Hochwasserabschätzung spielt die Konzentrationszeit eines Einzugsgebietes $[t_c]$ eine wichtige Rolle. Sie entspricht der längsten Fliesszeit in einem Gebiet. Bei einer Niederschlagsdauer, welche der Konzentrationszeit entspricht, werden normalerweise die höchsten Spitzenabflüsse erzeugt. Da aufgrund unserer Analyse die Unit Hydrographen wesentlich von der Niederschlagsdauer abhängen, kann nun der Unit Hydrograph jenes Ereignisses als repräsentativ angesehen werden, dessen Niederschlagsdauer der Konzentrationszeit am nächsten kommt. Die Konzentrationszeit wurde nach [2] über die hochwasserrelevanten (beitragenden) Flächen berechnet.

Ansatz zur Hochwasserbemessung (Synthese)

Bei der Hochwasserbemessung auf der Grundlage des Unit-Hydrograph-Verfahrens stellt sich als erstes die Frage, ob einzelne gemessene N/A-Ereignisse vorliegen. Ist dies nicht der Fall, muss mit einem synthetischen Unit Hydrographen gearbeitet werden (vgl. Bild 1). Ansätze zu dessen Ermittlung sind in [4] beschrieben. Wir behandeln nun den Fall, in dem einige N/A-Ereignisse ausgewertet werden können. Ziel der Bemessung ist es, die Ganglinie und den Spitzenabfluss eines Hochwasserereignisses der Jährlichkeit x zu schätzen. Das prinzipielle Vorgehen ist in Bild 9 zusammengestellt. Es basiert auf der Annahme, dass ein x -jährliches Hochwasser von einem Niederschlag derselben Jährlichkeit erzeugt wird.

Konzentrationszeit, repräsentativer Unit Hydrograph und Bemessungsniederschlag:

Zur Bestimmung der Konzentrationszeit bestehen verschiedene Ansätze. Gute Erfahrungen haben wir mit dem Ansatz von Koella [2] gemacht, der auch den Retentionseffekten im Hang Rechnung trägt. Die Konzentrationszeit nach Koella – als «massgebende Regendauer» $[TR_x]$ bezeichnet – setzt sich aus der Anlaufzeit und der Fliesszeit im Gerinne zusammen. Die Anlaufzeit berücksichtigt die Retentionsvorgänge in den beitragenden Flächen. Ihre Berechnung erfolgt iterativ, wobei vom Niederschlag gewisse von der Jährlichkeit bestimmte Benetzungsvolumen erreicht werden müssen. Die Benetzungsvolumen sind ihrerseits vom Bodentyp, von der Geologie und von der Landschaftseinheit abhängig. Die Fliesszeit im Gerinne kann von den beitragenden Flächen abgeleitet werden. Die beitragenden Flächen lassen sich über die kumulative

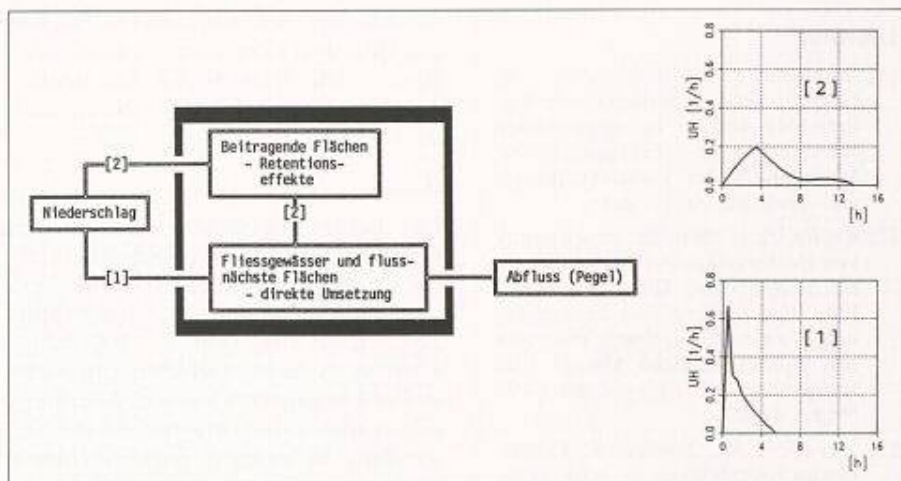


Bild 8. Interpretation der Ereignisabhängigkeit des Unit Hydrographen mittels des Konzepts der beitragenden Flächen

Gerinnelänge ermitteln. Die zur Bestimmung der Konzentrationszeit notwendigen Grundlagen sind in der Schweiz allüberall verfügbar.

Modellrechnungen haben ergeben, dass bei der Synthetisierung von Bemessungsganglinien die besten Ergebnisse mit dem repräsentativen Unit Hydrographen erzielt werden.

Als Bemessungsniederschlag wird nun jener Niederschlag gewählt, der mit einer Wiederkehrperiode von x Jahren während der Zeit TR_x fällt. Zu seiner Bemessung wird ein für das Einzugsgebiet möglichst repräsentatives Niederschlags-Intensitäts-Diagramm, wie es für eine grosse Zahl von Niederschlagsstationen der Schweiz vorliegt, benötigt. Neue Perspektiven eröffnen sich mit den regionalisierten Starkniederschlägen [6]: Es ist möglich, für einen beliebigen

Punkt der Schweiz ein solches Niederschlags-Intensitäts-Diagramm abzuschätzen. Der Niederschlag geht als Regen gleichbleibender Intensität $[r_x]$ in das Modell ein.

Abflussbeiwert:

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der weit verbreitete SCS-Ansatz für schweizerische Einzugsgebiete nicht eignet. Die von ihm angenommene Erhöhung des Abflussbeiwertes $[\alpha]$ mit zunehmender Niederschlagshöhe konnte in unseren Analysen nicht bestätigt werden. Im weiteren beinhaltet die Bestimmung der «curve-number» viele Unsicherheiten. Deshalb wird hier ein Verfahren vorgeschlagen, das erneut von den beitragenden Flächen (FL_{eff}) ausgeht: Setzt man voraus, dass die hochwasserrelevanten beitragenden Flächen bei einem Niederschlagsereignis

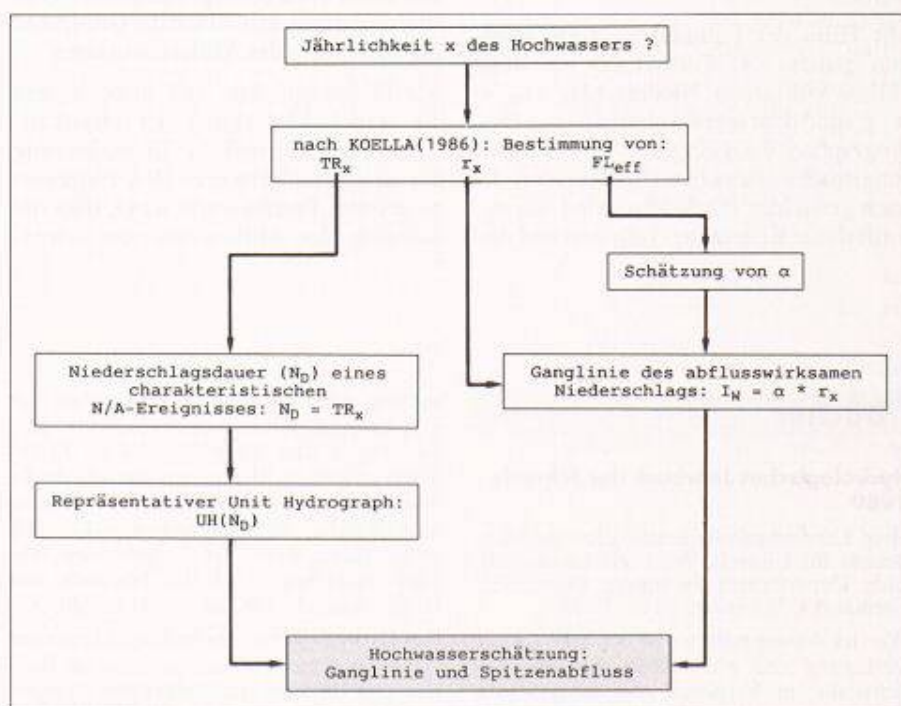


Bild 9. Vorgehen bei der Bemessung von Hochwasserabflüssen der Jährlichkeit x

Literatur

- [1] Aschwanden, H., Spreafico, M. (1989): Übertragungsfunktionen Niederschlag-Abfluss in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie, Nr. 11, Bern.
- [2] Koella, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessung – Eine Untersuchung über Zusammenhänge zwischen Gebietsparametern und Spitzenabflüssen kleiner Einzugsgebiete. Mitteilungen der VAW, Nr. 87, Zürich.
- [3] Spreafico, M., Stadler, K. (1986): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie, Nr. 7 und 8, Bern.
- [4] Weingartner, R. (1989): Das Unit-Hydrograph-Verfahren und seine Anwendung in schweizerischen Einzugsgebieten. Publikation Gewässerkunde Nr. 107, Bern.
- [5] Weingartner, R., Spreafico, M. (1990): Analyse und Abschätzung von Hochwasserabflüssen – Eine Übersicht über neuere schweizerische Arbeiten. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Jg. 1990, Heft 2, Koblenz.
- [6] Geiger, H., Stehli, A., Röthlisberger, G. und Zeller, J. (1992): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode 1901–1970. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz: Tafel 2.4, Bern (in Vorbereitung).

nis zu 100% entwässern, so kann aus dem Verhältnis der beitragenden Flächen zur Gesamtfläche des Einzugsgebietes der Abflussbeiwert $[\alpha]$ geschätzt werden.

Mit Hilfe der Faltungsoperation kann nun gemäss der Formel (2) aus dem abflusswirksamen Niederschlag ($I_w = \alpha \cdot r_x$) und dem repräsentativen Unit Hydrographen die Ganglinie des Bemessungshochwassers berechnet werden. Je nach gesuchter Jährlichkeit sind das erforderliche Benetzungsvolumen und die

Ausdehnung der beitragenden Flächen mit Hilfe von Korrekturverfahren anzupassen. Die Berechnung der Bemessungsganglinie erfolgt ansonsten nach demselben Schema.

Wertung der Ergebnisse

Der Bemessungsansatz wurde in den sieben Untersuchungsgebieten optimiert. Die zu Vergleichszwecken extremwert-statistisch bestimmten Spitzenabflüsse HQ_x (mit $x \leq 100$ Jahre) konnten in diesen Gebieten zufriedenstellend angenähert werden. Allerdings liegen noch keine Erfahrungen zur Anwendung in anderen Einzugsgebieten vor.

Die Schweiz verfügt über dichte hydrologische und meteorologische Messnetze. Diese Gegebenheiten sind die Grundvoraussetzung zur Anwendung des Bemessungsansatzes. Das Verfahren setzt zwar wenige Vorkenntnisse zu den im Einzugsgebiet ablaufenden physikalischen Prozessen voraus, benötigt aber eine Reihe gut dokumentierter Hochwasserereignisse.

Die Vorteile des Verfahrens liegen sicherlich einmal in der einfachen Handhabung. Es eignet sich deshalb besonders auch für Vorprojekte, in denen mit geringem zeitlichen und finanziellen Aufwand möglichst gute Richtwerte für die Hochwasserspitzen festzulegen sind. Dem Verfahren liegt eine einheitliche, an den beitragenden Flächen orientierte Betrachtungsweise zugrunde. Auf den beitragenden Flächen basiert die Interpretation der Streuung der Unit Hydrographen; sie sind Ausgangspunkt für die Bestimmung der Konzentrationszeit und damit auch des repräsentativen Unit Hydrographen und bilden die Grundlage zur Schätzung des Abflussbeiwertes.

Als Problempunkte sind insbesondere die starke Abstraktion der physikalischen Prozesse und die Linearisierung des an sich nichtlinearen N/A-Prozesses zu nennen. Erschwerend wirkt, dass die Streuung der Abflussbeiwerte weitge-

hend nicht erklärbar ist. Mit ähnlichen Problemen sind aber auch viele andere Modellansätze konfrontiert.

Verbesserungen liessen sich beispielsweise durch die Berücksichtigung von Abminderungskurven und durch die Optimierung der Ganglinie des Bemessungsniederschlags erzielen.

Die Annahme, dass ein x-jährliches Hochwasser von einem Niederschlag derselben Jährlichkeit erzeugt wird, blieb in unseren Analysen weitgehend unbestätigt. Sie musste mangels besserem Wissen gesetzt werden.

Ausblick

Wie das NF-Teilprojekt «Abschätzung der Abflüsse an Stellen ohne Direktmessung» und das 1989 in Angriff genommene Projekt «Hydrologischer Atlas der Schweiz» beweisen, gehört die räumliche Abschätzung hydrologischer Parameter nach wie vor zu den wichtigsten Aufgaben der Hydrologie. Dies gilt im besonderen Masse auch für den Hochwasserbereich.

In der Schweiz sind Messreihen von bereits rund 250 Abflussstationen extremwert-statistisch bearbeitet. In einem dieses Jahr gestarteten Projekt werden nun – basierend auf diesen Daten – Regionalisierungsverfahren entwickelt, um zu einer Bemessung von Hochwassern in Einzugsgebieten ohne Direktmessung des Abflusses zu gelangen.

Dank leistungsfähiger geographischer Informationssysteme stehen heutzutage umfangreiche, hydrologisch relevante räumliche Daten (Einzugsgebietsparameter) zur Verfügung, welche für die Regionalisierung hydrologischer Daten neue Perspektiven eröffnen. Wir stehen sozusagen vor einem Neubeginn!

Adresse der Verfasser: Dr. Manfred Spreafico, Landeshydrologie und -geologie, 3003 Bern, und Dr. Rolf Weingartner, Geographisches Institut der Universität Bern, 3012 Bern.

Bücher

Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 1989

Hrsg. Landeshydrologie und -geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Eidg. Departement des Innern, Bern, 1991, Format A4, 385 Seiten. Preis: Fr. 85.–.

Wieviel Wasser steht wo in der Schweiz zur Verfügung und wie verhält sich das Berichtsjahr im Vergleich zum langjährigen Mittel? Wirkt sich eine allfällige Klimaänderung bereits auf das Wasserdargebot aus? Zu

solchen und ähnlichen Fragen liefert das «Hydrologische Jahrbuch der Schweiz» gute Unterlagen. Das langfristig und auf Kontinuität ausgelegte Messprogramm erlaubt die Auswertung von Datenreihen, die z.T. bis ins letzte Jahrhundert zurückreichen. Kürzlich ist aus dieser Reihe die Ausgabe zum Jahr 1989 erschienen. Auch das Jahrbuch zum Hochwasserjahr 1987 ist wieder erhältlich.

Das Hydrologische Jahrbuch wird heute auf vielfältige Weise zu Rate gezogen: im Rahmen von Umweltverträglichkeitsprüfungen, für Fragen der Nutzung der Wasserkraft, für das Festlegen von Restwassermengen, zur

Bemessung von Massnahmen im Hochwasserschutz sowie im Bereich Gewässerschutz.

Das Jahrbuch enthält Angaben über Wasserstände, Abflüsse, Wassertemperaturen, den Schwebstoffgehalt sowie physikalische und chemische Parameter des Wassers. Die tabellarischen Darstellungen enthalten nebst den Resultaten aus dem Berichtsjahr die langjährigen Mittelwerte sowie die aufgetretenen Extremwerte und zeigen dazu den jahreszeitlichen Verlauf. Die Abflüsse werden auch als Dauerkurve angegeben, die Wasserstände und verschiedene physikalische Parameter auch als Ganglinie.