Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 77 (1985)

Heft: 5-6

Artikel: Hochwasserschätzung zur Bemessung der Hochwasserentlastung von Talsperren

Autor: Vischer, Daniel / Naef, Felix

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940924

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: 11.07.2025

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

Hochwasserschätzung zur Bemessung der Hochwasserentlastung von Talsperren

Daniel Vischer und *Felix Naef*

Résumé: L'évaluation des crues pour le dimensionnement des évacuateurs de crues des barrages

Celui qui crée un danger doit entreprendre l'impossible pour le supprimer!
Ce vieux précepte juridique est également applicable aux barrages. En effet, avec la mise en service d'un barrage apparait le danger d'une rupture de celui-ci, avec les conséquences catastrophiques que cela entraine. Ce danger doit donc être supprimé grâce à différentes mesures, dont en particulier un dimensionnement sûr du barrage. Le choix d'un évacuateur de crues suffisamment grand fait partie de ce dimensionnement.
Mais, qu'entend-on par «suffisamment grand»? Comment peut-on déterminer une crue significative? Quelles sont les données hydrologiques à disposition? Comment peut-on les interpréter? Ces diverses questions sont ici abordées en présentant les méthodes aujourd'hui usitées.

Summary: Estimating flood peaks for dimensioning spillways of large dams

The responsibility for removing danger rests with him who creates it.
This well established principle of law is also applicable to large dams. Once a dam has been constructed, there is always the potential danger of a sudden emptying of the reservoir as a flood wave which can decimate everything in its path. This danger must be removed by applying certain measures, a fundamental one being a secure construction of the dam. Included in this general construction measure is the provision of an adequate spillway for discharging flood flows.
But how is "adequate" defined? How does one estimate the flood discharge in order to dimension the spillway correctly? What hydrological data exist to facilitate this task?, and how are such data to be processed and then interpreted? These questions are examined and briefly discussed in the light of methods that are currently used for this purpose.

Wer eine Gefahr schafft, muss das Menschenmögliche vorkehren, um sie zu bannen!

Dieser alte Rechtsgrundsatz gilt selbstverständlich auch für Talsperren. Denn mit der Inbetriebnahme einer Talsperre wird die Gefahr eines Seeausbruchs geschaffen, der im allgemeinen katastrophale Folgen zeitigt. Demtentsprechend muss diese Gefahr durch verschiedene Massnahmen, insbesondere durch eine sichere Bemessung der Talsperre, ausgeschlossen werden. Zu dieser Bemessung gehört auch die Wahl einer genügend grossen Hochwasserentlastung.
Was heisst aber «genügend gross»? Wie wird das massgebende Hochwasser bestimmt? Welche hydrologischen Daten stehen zur Verfügung? Wie werden diese ausgewertet? Auf diese Fragen wird hier kurz eingegangen, indem heute gebräuchliche Verfahren vorgestellt werden.

1. Das Bemessungshochwasser

Eine Hochwasserentlastung ist im wesentlichen eine Überlaufsicherung. Sie muss also derart bemessen werden, dass ein Überlaufen des Stausees über nicht dafür vorgesehene Teile der Talsperre und angrenzende Ufer ausgeschlossen wird. Der massgebende Belastungsfall ist in der Regel ein extremes Hochwasserereignis.
Über die Bedeutung des Wortes «extrem» in diesem Zusammenhang lässt sich sehr vieles sagen. Letztlich führt die entsprechende Diskussion fast ins Philosophische. Doch nützen qualitative Aussagen wenig; es gilt quantitative zu finden. Unter Abwägung der verschiedenen Aspekte definiert das zuständige Bundesamt für Wasserwirtschaft den massgebenden Belastungsfall wie folgt (*Biedermann* 1984):

«Bei der Bemessung bzw. Beurteilung der *Hochwassersicherheit* gehen wir vom tausendjährlichen Hochwasser aus, weil dieses unserer Meinung nach aufgrund der verfügbaren Hochwasserdaten gerade noch einigermassen zuverlässig abgeschätzt werden kann. Weiter wird vorausgesetzt, dass dieses «Bemessungshochwasser» auf den normal gefüllten Speicher auftreffe. Zur Wasserableitung werden unter gewissen Voraussetzungen alle verfügbaren Ablassorgane zugelassen, also ausser dem eigentlichen Hochwasserentlastungsorgan auch der Grundablass, allfällig vorhandene Zwischenablässe sowie die Triebwasserleitung, letztere allerdings nur mit einer Kapazität, die der Schluckfähigkeit von n–1 Turbinen entspricht. Von allen Ablässen mit beweglichen Verschlussorganen darf jedoch das leistungsfähigste, weil als blockiert angenommen, nicht in Rechnung gesetzt werden. Ferner darf die Triebwasserleitung nur dann einbezogen werden, wenn die Zentrale auch im Falle eines Katastrophenhochwassers nicht überflutet wird und wenn von ihr zwei unabhängige Hochspannungsleitungen abgehen. Bei diesen Zufluss- und Abflussbedingungen wird der Wasserspiegel im Speicher einen bestimmten Höchststand erreichen. Es wird nun verlangt, dass dieser bei Staumauern um 0,50–1,00 m, bei Staudämmen um 1,50–3,00 m unter Oberkante Krone zurückbleibt (= reduziertes Freibord). Mit dieser Zusatzbedingung und angesichts der grossen Wahrscheinlichkeit, dass das als blockiert angenommene Ablassorgan im gegebenen Fall eingesetzt werden kann, wird eine Hochwassersicherheit erreicht, die ganz erheblich – jedoch nicht bezifferbar – über einem Schutz gegen das tausendjährliche Hochwasser liegt.»

Das Hochwasser mit der entsprechenden Wiederkehrperiode muss aufgrund der vorhandenen hydrologischen, meteorologischen und topographischen Daten abgeschätzt werden, wobei das Vorgehen davon abhängig ist, ob in dem betreffenden Einzugsgebiet
– langjährige Abflussmessungen (Kapitel 2),
– Niederschlagsaufzeichnungen und entsprechende statistische Auswertungen (Kapitel 3),
– weder Niederschlags- noch Abflussregistrierungen (Kapitel 4) vorliegen.

2. Die Auswertung von Abflussmessungen

2.1 Abflussstatistik

In der heutigen Diskussion über Hochwasserabflüsse wird viel von Niederschlag-Abfluss-Modellen gesprochen. Dies erweckt bisweilen den Eindruck, als müssten Hochwasserabflüsse grundsätzlich über Niederschlagsmessungen bestimmt werden, also beispielsweise das tausendjährliche Hochwasser über eine tausendjährliche Niederschlagsintensität. Doch täuscht dieser Eindruck. Denn dort, wo repräsentative Messungen einer langjährig und zuverlässig betriebenen Abflussmessstation zur Verfügung stehen, stützt man sich bei der Ermittlung extremer Abflüsse selbstverständlich auf diese. Hochwasser lassen sich mit einer Abflussstatistik aus Abflussmesswerten genauer festlegen als aus Niederschlagsmesswerten und unsicheren Annahmen über den Abflussprozess. Der Umweg über die Nieder-

schlagsmessungen wird nur eingeschlagen, wenn keine oder nur sehr kurzfristige Abflussmessungen vorliegen (siehe Kapitel 3).

In der Schweiz sind die Aufzeichnungen einer Abflussmessstation in der Regel veröffentlicht, und zwar entweder in den Hydrologischen Jahrbüchern der Schweiz oder in ähnlichen Veröffentlichungen der Kantone. Als repräsentativ kann in der Regel jene Abflussmessstation betrachtet werden, die in der Nachbarschaft der interessierenden Talsperre am selben oder an einem ähnlichen Gewässer liegt. Interessiert man sich nur für die Hochwasserspitzen, greift man aus den zugehörigen Jahrbüchern sämtliche Jahresmaxima einer ununterbrochenen Messreihe heraus und stellt damit eine Rangliste auf. Daraus gewinnt man mit der Formel

$$p = \frac{r}{m + 1}$$

mit r = Rang,
m = Anzahl Jahresmaxima
(bzw. Dauer der Messreihe in Jahren)

die empirische Überschreitungswahrscheinlichkeit; der reziproke Wert stellt die empirische Jährlichkeit dar.

Tabelle 1 zeigt als Beispiel die Jahresmaxima der 37jährigen Messreihe von 1945–1981 des Hinterrheins (Abflussmessstationen Hinterrhein, Einzugsgebietsfläche 54 km², mittlere Höhe 2360 m ü. M.).

Nun umfasst eine Messreihe in der Schweiz selten mehr als 30 bis 50 Jahre, so dass das verfügbare Datenkollektiv unmittelbar nur die 30- bis 50jährliche Hochwasserspitze liefert. Hochwasser grösserer Jährlichkeit müssen daher durch Extrapolation geschätzt werden. Zu diesem Zweck werden die Werte von Tabelle 1 durch eine Wahrscheinlichkeitsfunktion angenähert, die eine solche Extrapolation gestattet.

Tabelle 1. Beispiel eines Datenkollektivs. Rangliste und empirische Überschreitungswahrscheinlichkeit bzw. Jährlichkeit für den Hinterrhein bei Hinterrhein für die Messperiode 1945–1981.

Rang r	Jahres maximum Q_r	Empirische Ueberschreitungswahrscheinlichkeit p	Empirische Jährlichkeit w	r	Q_r	p
1	115	.03	38	26	49	.68
2	110	.05	19	27	46	.71
3	100	.08	13	28	45	.74
4	100	.10	10	29	44	.76
5	90	.13	8	30	43	.79
6	89	.16	6	31	42	.82
7	86	.18	5	32	40	.84
8	84	.21	5	33	36	.87
9	76	.24	4	34	34	.90
10	75	.26		35	30	.92
11	66	.29		36	22	.95
12	65	.32	3	37	19	.97
13	65	.34				
14	63	.37				
15	61	.40	2.33			
16	60	.42				
17	60	.45				
18	60	.47				
19	60	.50	2			
20	58	.53				
21	54	.55				
22	53	.58				
23	52	.60				
24	50	.63				
25	49	.66				

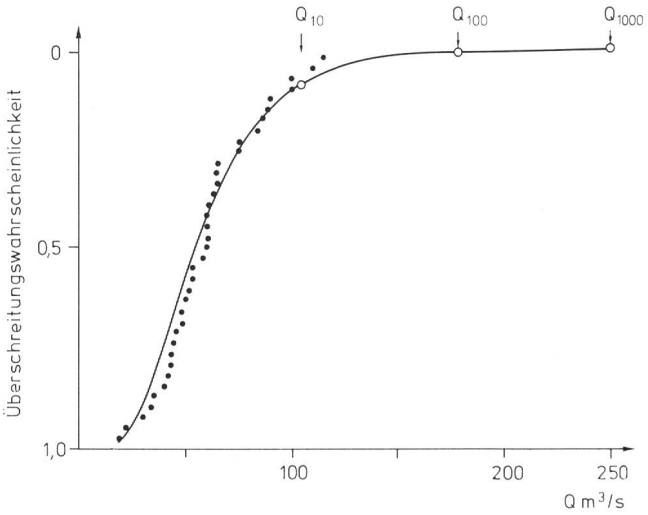


Bild 1. Hochwasserspitzen in Funktion der Überschreitungswahrscheinlichkeit im unverzerrten Massstab. Hinterrhein bei Hinterrhein.

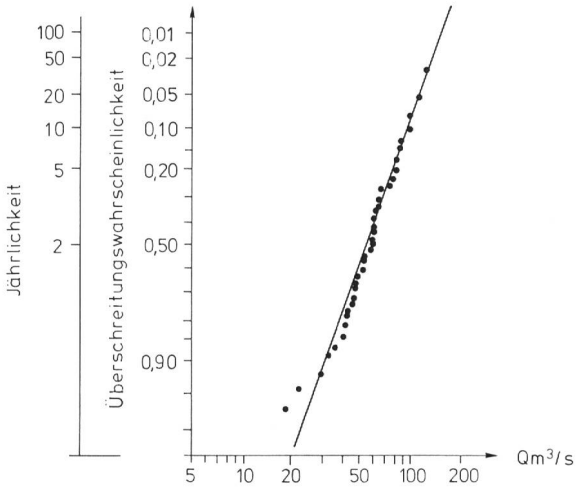


Bild 2. Hochwasserspitzen in Funktion ihrer Jährlichkeit im verzerrten Massstab. Die Abszisse ist logarithmisch verzerrt, die Ordinate nach dem Gaussschen Integral. Dies entspricht der sogenannten Lognormal-Verteilung. Hinterrhein bei Hinterrhein.

Ohne auf Einzelheiten einzugehen sei hier folgendes erläutert: Eingetragen in Bild 1 sind die am Hinterrhein gemessenen Jahresmaxima und ihre empirischen Wahrscheinlichkeiten sowie die daran angepasste Lognormal-Verteilung. Üblicherweise wird aber für solche Auswertungen Wahrscheinlichkeitspapier verwendet (Bild 2), bei dem die Achsen verzerrt sind. Bei der hier verwendeten Lognormal-Verteilung ist die Abszisse logarithmisch und die Ordinate nach dem Gaussschen Integral verzerrt. Entsprechen die empirischen Werte dieser Verteilung, so liegen sie hier auf einer Geraden. Die Anpassung der Verteilung an die empirischen Werte und die Extrapolation auf höhere Jährlichkeiten wird damit sehr einfach.

Ausser der Lognormal-Verteilung (auch Galton-Verteilung genannt), die das *Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau* (1974) für die Schweiz empfiehlt, werden für die Abschätzung von Abflüssen auch die Wahrscheinlichkeitsverteilungen von *Pearson, Goodrich, Fuller, Gumbel* und *Frechet* verwendet.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung in Bild 1 und 2 ist nur bis zu einer Jährlichkeit von 38 empirisch belegt. Extrapolationen bis etwa auf das Doppelte der Messdauer lassen noch sinnvolle Resultate erwarten.

Extrapolationen auf höhere und höchste Jährlichkeiten sind mathematisch oder graphisch ohne weiteres möglich;

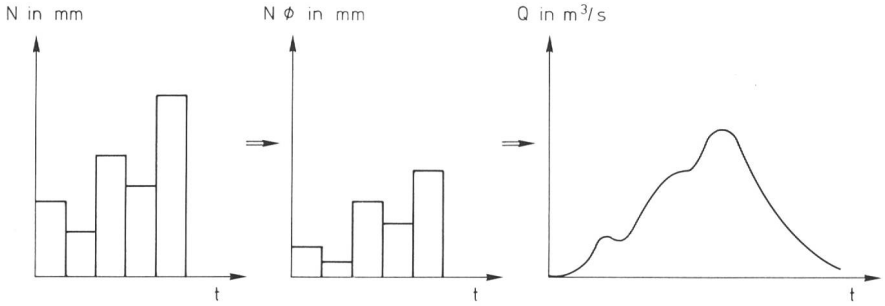


Bild 3. Abflussprozess: Umwandlung der Ganglinie der Niederschlagsintensität N in eine solche der Abflussintensität Φ · N und Übertragung in die entsprechende Ganglinie des Hochwasserabflusses Q.

die so hergeleiteten Abflüsse sind jedoch rein rechnerische Grössen, die vor allem geprägt sind von den Eigenschaften der gewählten Wahrscheinlichkeitsverteilung. Sie sind nicht abgesichert durch Erfahrungswerte. Da keine 1000jährlichen Abflussmessreihen existieren, ist nicht zu entscheiden, ob sich ein 1000jähriches Hochwasser in die Reihe der gemessenen Abflussmaxima einordnen lässt oder ob bei ausserordentlichen Ereignissen nicht vielmehr so grosse Diskontinuitäten im Niederschlags- und Abflussprozess auftreten, dass diese Werte «aus der Reihe tanzen».

3. Die Auswertung von Niederschlagsmessungen

3.1 Der Abflussprozess

Wie bereits erwähnt, bestimmt man die Hochwasser und ihre Jährlichkeiten nur dann anhand von Niederschlagsmessungen, wenn man sich nicht auf Abflussmessungen stützen kann oder wenn Abflüsse nur kurzfristig gemessen worden sind. Voraussetzung ist, dass Niederschlagsmessungen in genügender Qualität vorhanden sind.

Die Schwierigkeiten bei der Abschätzung von Hochwassern aus Niederschlägen besteht darin, dass der Abflussprozess einbezogen werden muss, um die Verformung der Niederschlagsganglinie in die Abflussganglinie bestimmen zu können. Formal kann das wie folgt geschrieben werden:

$$HQ = \text{Max}\,[Q_t] = \text{Max}\,[\text{fkt}\,(N_t, \Phi_t, f_t)]$$

Der Abfluss wird also durch das Zusammenwirken der drei Grössen N_t, Φ_t, f_t bestimmt. Um das Maximum zu finden, müssen Niederschlagsganglinien von unterschiedlichem Verlauf und Dauer durchgerechnet werden. N_t steht für die in Bild 3 skizzierte Ganglinie der Niederschlagsintensität. Dabei sind selbstverständlich nur Niederschlagsintensitäten von Interesse, die zu Hochwasserereignissen führen (eventuell vermehrt durch die Schneeschmelze).

Φ ist der sogenannte Abflusskoeffizient. Er gibt den Anteil der Niederschlagsintensität an, der zum Hochwasserabfluss beiträgt. Im Gegensatz zu einer in der Praxis verbreiteten Meinung ist dieser Koeffizient nicht konstant, sondern zeitlich veränderlich. In Bild 3 ist aber nicht seine Ganglinie, sondern jene des Produktes Φ · N aufgeführt. Dieses wird gelegentlich als Abflussintensität oder abflusswirksamer Niederschlag bezeichnet. f stellt eine Übertragungsfunktion dar, die gleichsam die Umwandlung der Ganglinie Φ · N in die Ganglinie des Hochwasserabflusses Q und damit der gesuchten Funktion beinhaltet.

Über die Probleme der Messung der Niederschlagsintensität N soll hier nicht gesprochen werden. Hingegen ist darauf hinzuweisen, dass solche Messungen nur an einigen wenigen Punkten im oder in der Nähe des betrachteten Einzugsgebietes erfolgen. Sie ergeben die Gebietsniederschlagsintensität deshalb nicht unmittelbar, sondern nur aufgrund von Inter- und Extrapolationen in Abhängigkeit von topographischen und anderen Parametern.

Der Abflusskoeffizient Φ steht in einem komplexen Zusammenhang mit Gebietsparametern wie der Bodenart, der Durchlässigkeit, des Bewuchses, der Geländeneigung usw. Er ist aber auch eine Funktion der Bodensättigung und damit der Vorniederschläge sowie der Niederschlagsintensität N selbst.

Auch die Übertragungsfunktion f ist mit vielen Gebietsparametern verquickt, die die Fliesszeiten und das Rückhaltevermögen des Einzugsgebietes bestimmen. Sie hängt aber auch von Q selbst ab.

Im folgenden werden einige Verfahren zur Abschätzung von Hochwassern aus Niederschlägen beschrieben. Jedes Verfahren, von der einfachen Formel bis zum komplexen Niederschlag-Abfluss-Modell, enthält Annahmen über den beschriebenen Abflussprozess. Die Kenntniss dieser Prozesse, die wegen der grossen Variation der wesentlichen Gebietsparameter schwer zu erfassen sind, ist heute noch unvollständig.

3.2 Das Fliesszeitverfahren

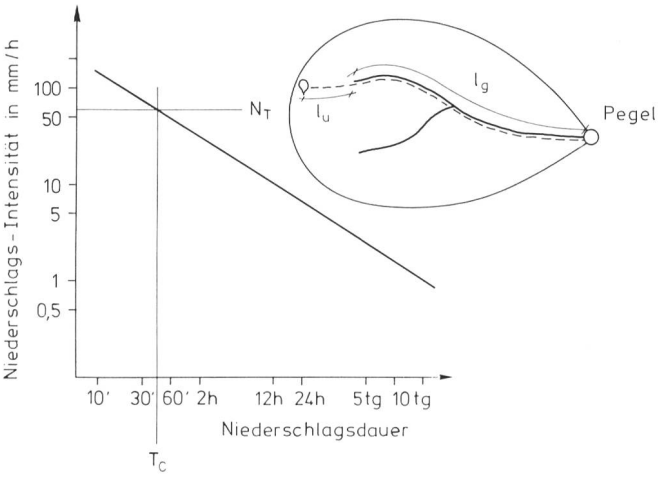
Das Fliesszeitverfahren erfasst den im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Zusammenhang mit der Beziehung

$$HQ = N_T \cdot c \cdot A$$

Es handelt sich dabei wohl um die einfachst mögliche Näherung des Abflussprozesses.

N_T ist die Niederschlagsintensität für eine Regendauer T, die der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes entspricht. N_T kann aus *Zeller* (1976) bestimmt werden. Die Zeit T kann als Fliesszeit des «hintersten Tropfens» im Einzugsgebiet bis zum interessierenden Gerinnequerschnitt bezeichnet werden (Bild 4). Die Annahme ist, dass ein Niederschlagsereignis, dessen Dauer der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes entspricht, das grösstmögliche Hochwasser erzeugt. Bei einem kürzeren Ereignis ist zwar die Niederschlagsintensität grösser, aber es trägt nicht das gesamte Gebiet zum Abfluss bei; bei einem längeren Ereignis trägt zwar das ganze Gebiet zum Abfluss bei, aber die durchschnittliche Niederschlagsintensität ist kleiner.

Bild 4. Niederschlagsintensität in Funktion der Niederschlagsdauer (oben) und Bedeutung der Fliesszeit T, die sich aus dem Fliessweg überland (l_u und im Gerinne (l_g) für den «hintersten Tropfen» ergibt (unten).



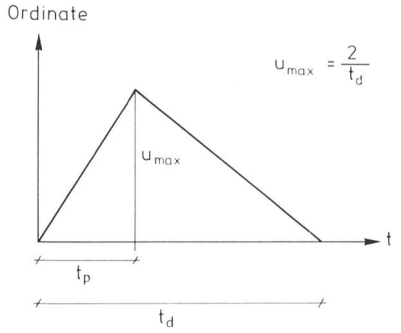


Bild 5. Parameter t_p, t_d, die die dreieckförmige Einheitsganglinie bestimmen.

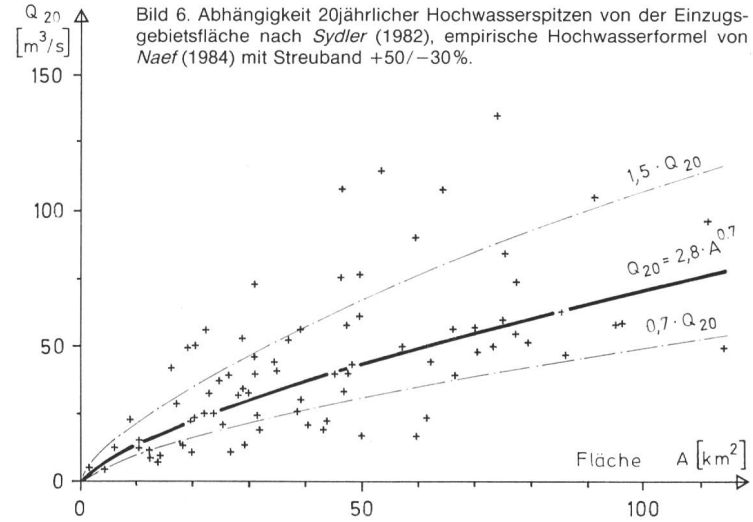


Bild 6. Abhängigkeit 20jährlicher Hochwasserspitzen von der Einzugsgebietsfläche nach *Sydler* (1982), empirische Hochwasserformel von *Naef* (1984) mit Streuband +50/−30%.

c ist der sogenannte Scheitelabflusskoeffizient; er ergibt definitionsgemäss den Scheitel, das heisst das Maximum der Hochwasserganglinie, und darf nicht mit dem zeitlich veränderlichen Abflusskoeffizienten Φ_t verwechselt werden. c liegt meist zwischen 0,2 und 0,6 und muss vom Ingenieur nach seinem Ermessen oder mit Hilfe von Tabellen geschätzt werden.
A steht für die Einzugsgebietsfläche.
Das Fliesszeitverfahren hat sich vor allem in der Kanalisationstechnik bewährt, wo es für die Ermittlung der maximalen Regenwasserabflüsse aus kleinen, versiegelten Flächen verwendet wird. Hier, wie auch in steilen, undurchlässigen Einzugsgebieten treffen die Annahmen, die dem Fliesszeitverfahren zugrunde liegen, etwa zu.
Die Fliesszeit in natürlichen Einzugsgebieten setzt sich zusammen aus der Fliesszeit Überland t_u, die zum Beispiel mit der Formel von *Izzard* [siehe zum Beispiel *Zeller,* 1981] und der Fliesszeit im Gerinne t_g, die nach der Formel von Strickler abgeschätzt werden kann.

$$t_u = 527 \cdot c_b \cdot \left(\frac{l_u}{J \cdot i_e^2}\right)^{1/3}$$

wobei

t_u = Anlaufzeit in Minuten
l_u = mittlere Weglänge des gerinnelosen Abflusses in m
J = mittlere Hangneigung
i_e = Abflussintensität (= c · N) in mm/h
c_b = Bodenbeschaffenheit:
c_b = 0,007 für Asphalt
= 0,046 für Mähwiese
= 0,060 für dichtes Gras auf torfigem Boden

$t_g = l_g/(k \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2})$

wobei

t_g = Fliesszeit im Gerinne in s
l_g = Gerinnelänge in m
k = k-Wert des Gerinnes nach Strickler
R = hydraulischer Radius
J_g = Gerinnegefälle

Da die Fliesszeit von der Regenintensität und die Regenintensität wiederum von der Fliesszeit abhängig ist, ist ein iteratives Vorgehen nötig. In flachen Einzugsgebieten mit natürlichen Böden, die ein nicht zu vernachlässigendes Wasserspeichervermögen besitzen, ist das Fliesszeitverfahren nicht zu empfehlen: Die massgebende Regendauer ist meist beträchtlich länger als die errechnete Fliesszeit, und durch die Gebietsretention wird die Hochwasserwelle wesentlich verformt, so dass beträchtliche Abweichungen zu den mit dem Fliesszeitverfahren errechneten Werten entstehen.

3.3 Die Einheitsganglinie

Besser geeignet für weniger steile Gebiete, die grösser als einige km² sind, ist das Verfahren der Einheitsganglinie, das auch unter seinem englischen Namen Unit-Hydrograph-Verfahren bekannt ist. Die Anwendung ist allerdings aufwendiger, und es setzt voraus, dass zum Auffinden des höchsten Abflusses verschiedene Niederschlagsverteilungen durchgerechnet werden. Als Ergebnis steht aber nicht nur eine Hochwasserspitze, sondern der Verlauf der Hochwasserwelle zur Verfügung.

Die Anwendung ist für die Praxis detailliert und mit Beispielen beschrieben in drei Heften des *DVWK* (1982, 1982a, 1984). Diese Arbeitsanleitungen sind ausgerichtet auf mittlere Verhältnisse in Deutschland, die Anpassung auf schweizerische Verhältnisse steht noch aus. Sie werden aber zur Lektüre empfohlen, da sie einen guten Überblick über die Problematik und die Lösungsmethoden geben.
Grundlage des hier beschriebenen Verfahrens ist die Annahme, dass ein abflusswirksamer Regen von 1 mm, der über dem Einzugsgebiet während einer Stunde fällt, eine für das Gebiet charakteristische Abflussganglinie erzeugt, die sogenannte Einheitsganglinie. Es wird weiter angenommen, dass das Superpositionsprinzip gültig ist: Wenn in einer Stunde 3 mm Regen fallen, so ergibt sich die Abflussganglinie durch 3fache Überlagerung der Einheitsganglinie. Fallen während 2 Stunden je 1 mm, ergibt sich der Abfluss durch Superposition von 2 um eine Stunde verschobenen Einheitsganglinien. Ist also die Einheitsganglinie und der abflusswirkame Regen in einem Einzugsgebiet bekannt, lässt sich jede Abflussganglinie berechnen.

Das Vorgehen bei der Bestimmung der Einheitsganglinie hängt davon ab, was für Daten aus dem Gebiet vorhanden sind. Sind keine oder nur sehr wenige Daten vorhanden, wird die Einheitsganglinie durch ein Dreieck angenähert, das durch zwei Parameter t_p und t_d beschrieben ist (Bild 5). u_{max} ergibt sich aus der Bedingung, dass die Fläche unter der Einheitsganglinie gleich eins ist. t_p entspricht in erster Näherung etwa der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes.

Die Basis t_d ist um so grösser, je grösser das Retentionsvermögen des Einzugsgebietes ist. t_d hat über die Flächenbedingung, wie leicht zu sehen ist (Bild 5), massgebenden Einfluss auf die Abflussspitze. Liegen Messungen von einigen Hochwasserwellen aus dem Einzugsgebiet vor, lässt sich t_d daraus abschätzen. Wenn nicht, muss man sich behelfen, indem t_d mit Hilfe von Einheitsganglinien aus ähnlichen Gebieten abgeschätzt wird.

Zuvor muss noch der abflusswirksame Anteil des Regens abgeschätzt werden. In *DVWK* (1984) wird dafür das SCS-Verfahren vorgeschlagen und detailliert beschrieben.
Das SCS-Verfahren ist aber nicht ohne Probleme [*Naef,* 1985], so dass empfohlen wird, die damit erhaltenen Abflusskoeffizienten anhand von gemessenen Abflusskoeffizienten aus ähnlichen Gebieten zu überprüfen.

3.4 Kompliziertere Niederschlag-Abfluss-Modelle

Das Einheitsganglinien-Verfahren stellt nur ein grobes Abbild der Vorgänge in einem Einzugsgebiet dar. Seit dem Aufkommen von leistungsfähigen Computern sind sehr viel aufwendigere Modelle entwickelt worden. Bei ihnen wird beispielsweise der Boden in mehrere Schichten aufgeteilt, die sich unterschiedlich verhalten und deren Interaktion berücksichtigt wird.
Allerdings werden solche Modelle heute vor allem für Abflussprognosen eingesetzt und nur in Ausnahmefällen zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen.
Das Hauptproblem bei der Anwendung solcher Modelle ist, dass lange Reihen von gleichzeitig gemessenen Niederschlägen und Abflüssen benötigt werden, um sie zuverlässig eichen zu können. Mit den heute verfügbaren Daten ist es aber nicht möglich zu zeigen, dass diese Modelle bessere Resultate liefern als sehr einfache Modelle [*Naef,* 1981].

4. Die Verwendung von Hochwasserformeln

4.1 Empirische Hochwasserformeln

Die empirische Hochwasserformel ist meist von der Form:

$HQ = a \cdot A^b$

mit a, b = Koeffizienten
A = Einzugsgebietsfläche

Der Exponent b liegt, wie zahlreiche Untersuchungen zeigen, zwischen ½ und ⅘. Dementsprechend sagt die Hochwasserformel aus, wie eine Hochwasserspitze von der Einzugsgebietsfläche abhängt: Sie wächst nicht proportional zu dieser, sondern unterproportional. Sind die Koeffizienten a und b bekannt, lässt sich die Hochwasserspitze direkt abschätzen.
Einen interessanten Einblick in die entsprechende Problematik liefert eine Zusammenstellung von *Sydler* (1982). Dieser bestimmte die 20jährlichen Hochwasserspitzen von 88 in der Schweiz, in Bayern und in Oberösterreich liegenden kleinen, das heisst bis etwa 100 km² messenden Einzugsgebieten. Trägt man die Werte in Abhängigkeit der zugehörigen Einzugsflächen auf, erhält man im unverzerrten Diagramm von Bild 6 einen «Sternenhimmel». Die Streuung zeigt deutlich, dass der Parameter Einzugsgebietsfläche A nicht genügt, um Hochwasserspitzen zu berechnen; es müssen offensichtlich noch andere Parameter eingeführt werden. *Sydler* (1982) hat dies auch versucht und den Einfluss von weiteren Gebietsparametern, wie der Gefällsverhältnisse, der Höhenlage, des Wald- oder des Gletscheranteils usw. in Rechnung gestellt. Doch hat er dabei keine systematischen Abhängigkeiten gefunden.
Mit dem Ansatz einer empirischen Hochwasserformel fand *Naef* (1985) anhand desselben Datensatzes die Formel

$HQ_{20} = 2{,}8\ A^{0{,}7}$

Die entsprechende Kurve ist in Bild 6 zusammen mit einem Streuband von + 50% und − 30% eingetragen. Ein solches Streuband scheint angesichts der Unsicherheiten bei der Bestimmung von Hochwasserspitzen in kleineren Bächen (meist Wildbächen) nicht übertrieben. Erstaunlicherweise liegt mehr als die Hälfte der Messwerte darin.
Einen weiteren Einblick in die Zusammenhänge vermitteln *Bruschin* und *Falvey* (1974). Sie ermittelten die Hochwasserspitzen von 43 schweizerischen Einzugsgebieten der Alpennordseite und stellten folgende empirische Hochwasserformeln auf:

$HQ_{2,3} = KA^{0{,}84}$

$HQ_{2,3}$ ist eine aus der Statistik gewonnene mittlere jährliche Abflussspitze. Das 20jährliche Hochwasser ist um den Faktor 1,8 grösser, das 100jährliche um den Faktor 2,3. Der Faktor K wurde in Funktion der geographischen Lage für die Alpennordseite der Schweiz bestimmt. Die kleinsten K-Werte liegen bei 0,2 die grössten bei 2,2; die zugehörigen Hochwasserformeln lauten folglich für ein 20jährliches Hochwasser:

$HQ_{20} = 0{,}4\ A^{0{,}84}$
bis $HQ_{20} = 4{,}0\ A^{0{,}84}$

Mit dieser Darstellung stützen sich die Autoren in erster Linie auf Klimaparameter und nur in zweiter Linie auf Gebietsparameter. Sie tragen unter anderem dem auch von *Vischer* (1980) beschriebenen Umstand Rechnung, dass die Hochwasser in gewissen Gebieten der Ostschweiz zwei- bis zweieinhalbmal so hoch ausfallen wie in gleichgrossen Gebieten der Westschweiz.
Aus diesen Ausführungen geht mit aller Deutlichkeit hervor, dass die Koeffizienten a und b einer empirischen Hochwasserformel nicht generell angegeben werden können, sondern praktisch von Ort zu Ort variieren. Damit ist auch gesagt, dass von einer allgemeinen Anwendung der in der Praxis verbreiteten empirischen Hochwasserformeln von *Kürsteiner, Hofbauer, Melli* usw. abgeraten werden muss.

4.2 Umrechnung von Hochwassern auf grössere Einzugsgebiete

Die Abflussmessstation, die die Daten für die in Kapitel 2 geschilderte Abflussstatistik liefert, liegt meist nicht in unmittelbarer Nähe der Sperrstelle. Es gilt deshalb die Ergebnisse – also insbesondere die Hochwasserspitze der gewählten Jährlichkeit – von der Abflussmessstation auf die Sperrstelle umzurechnen. Ist das Einzugsgebiet der Sperrstelle ähnlich beschaffen wie jenes der Abflussmessstation – und man stützt sich zweckmässigerweise auf eine entsprechende Station – so kann für beide Einzugsgebiete in der Formel $HQ = a \cdot A^b$ derselbe Faktor a vorausgesetzt werden. Das erlaubt die Aufstellung der einfachen Umrechnungsformel

$HQ = HQ_M \cdot (A/A_M)^{½ \text{ bis } ⅘}$

mit HQ, A = Hochwasserspitze bzw. Einzugsgebietsfläche an der Sperrstelle
HQ_M, A_M = Hochwasserspitze bzw. Einzugsgebietsfläche an der Abflussmessstation

5. Schlussfolgerungen

Der hier erwähnte Überblick zeigt, dass schon sehr viel Arbeit geleistet worden ist, um Hochwasser einer gewünschten Jährlichkeit unter verschiedenen Umständen abschätzen zu können. Dass die Ergebnisse dennoch nur teilweise befriedigen, hat folgende Gründe:
– Die interessierenden Hochwasserereignisse sind definitionsgemäss selten und können dementsprechend nur selten beobachtet werden.
– Die Messungen der ursächlichen Niederschläge und Schneeschmelzen sowie der resultierenden Abflüsse sind fehlerhaft; oft werden Niederschlags- und Abflussmessstationen gerade während extremer Hochwasser ausser Betrieb gesetzt.
– Der Zusammenhang zwischen den Niederschlägen und den Hochwasserabflüssen, das heisst der Abflussprozess,

ist nur unvollständig bekannt und lässt sich schlecht quantifizieren.

An der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) läuft zurzeit in Zusammenarbeit mit der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV) ein vom schweizerischen Nationalfonds unterstütztes Projekt *«Abschätzung von Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten ohne Abflussmessung»*. Durch Zusammentragen der vorhandenen Daten und durch Berücksichtigung von neueren Erkenntnissen über den Abflussprozess sollen damit die Grundlagen verbessert werden, die dem Anwender in der Schweiz zur Abschätzung von Hochwassern zur Verfügung stehen.

Literatur

Biedermann R. 1984: Talsperrenüberwachung in der Schweiz unter spezieller Berücksichtigung der Frage einer Automatisierung. Vortrag gehalten am Wasserbau-Seminar vom 5. Januar 1984 der Technischen Hochschule Aachen, siehe Mitt. Nr. 50 des dortigen Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, 1984.

Bruschin J., Falvey H.T. 1974: Risques relatifs aux crues; réflexions à propos des résultats d'une analyse concernant la Suisse au nord des Alpes. Communication du Laboratoire de l'EPFL No 29, octobre 1974.

DVWK 1982: Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil 1: Analyse. Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 112, Verlag Paul Parey.

DVWK 1982a: Katalog von Übertragungsfunktionen, Materialien für die «Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten». DVWK Merkblätter, Bonn.

DVWK 1984: Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten, Teil 2: Synthese. Regeln zur Wasserwirtschaft, Heft 113, Verlag Paul Parey.

Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau 1974: Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern. Eidg. Material- und Drucksachenzentrale, Bern, 1974.

Naef F. 1981: Can we model the rainfall-runoff process today? Hydrological Sciences Bulletin, 26, 3, 9/1981.

Naef F. 1985: How does one estimate flood peaks in small catchments in Switzerland without discharge measurements? Beiträge zur Hydrologie. SH 5. Freiburg i. B. Im Druck.

Sydler P., Widmoser P., Zollinger F. 1982: Statistische Untersuchungen von Extremabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Institut für Kulturtechnik, ETH-Z.

Vischer D. 1980: Das höchstmögliche Hochwasser und der empirische Grenzabfluss. «Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 40, 1980.

Zeller J., Geiger H., Röthlisberger G. 1976: Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. EAFV, Birmensdorf.

Zeller J. 1981: Starkniederschläge und ihr Einfluss auf Hochwasser-Ereignisse, EAFV-Bericht Nr. 126.

Adresse der Verfasser: Prof. Dr. *Daniel Vischer* und Dr. *Felix Naef*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH-Zentrum, CH-8092 Zürich.

Vortrag gehalten an der Studientagung «Umbau und Reparaturen von Talsperren» des Schweizerischen Nationalkomitees für Grosse Talsperren, 20. und 21. September 1984 in Engelberg.

Electricité suisse sur timbres-poste suisses

Si un philatéliste décidait aujourd'hui de collectionner tous les timbres ayant pour sujet l'économie électrique suisse, il ne lui faudrait pour cela qu'une demi-page de son album. En effet, seules trois vignettes postales avaient été consacrées à «l'électricité suisse» jusqu'à la parution, cette année, du magnifique timbre-poste spécial de 80 centimes représentant le barrage de la Grande Dixence au Valais. Ce timbre a été réalisé à l'occasion du 15e congrès international des grands barrages qui se tiendra du 24 au 28 juin à Lausanne. Il se trouve que l'électricité et le lancer de la pierre (Steinstossen), sport folklorique pratiqué par quelques centaines d'enthousiastes tout au plus, ont fourni exactement le même nombre de sujets aux timbres-poste helvétiques, ce qui a de quoi surprendre lorsqu'on pense à l'importance capitale de la «houille blanche» comme source permanente d'énergie pour notre pays.

Il n'y avait jusqu'ici encore jamais eu de timbre-poste spécial suisse sur l'économie électrique. Les trois timbres de 1949, consacrés respectivement aux barrages, aux centrales et aux lignes de transport faisaient partie d'une série ordinaire faisant suite à celle de 1936. Selon le règlement du concours de l'époque, la nouvelle série devait montrer que l'intervention humaine à des fins d'utilisation technique de la nature n'excluait pas la beauté des paysages. L'objectif déclaré du Service philatélique des PTT était, cette année là, de présenter dans la nouvelle série non plus les beautés traditionnelles de la patrie mais des paysages ayant subi des modifications dues à des constructions, c'est-à-dire des interventions se justifiant par leur utilité en faveur de la population et du pays.

Swiss stamps and Swiss electricity

The first Swiss special postage stamp featuring electric power has been issued only recently at the occasion of the 15th International Congress on Large Dams, taking place in June in Lausanne, on Lake Geneva.

Figure 1.

Switzerland is known by philatelists for its remarkable stamps, and by engineers for its electrical industry. Thus it is surprising that, prior to this special issue, only three Swiss postal stamps have shown motives linked with Swiss elec-