Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 98 (1980)
Heft: 40

Artikel: Das höchstmögliche Hochwasser und der empirische Grenzabfluss
Autor: Vischer, Daniel
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-74218

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: 24.08.2025

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

Das höchstmögliche Hochwasser und der empirische Grenzabfluss

Von Daniel Vischer, Zürich

In den letzten Jahren sind in der Schweiz verschiedene Gebiete von Überschwemmungen heimgesucht worden. Dabei uferten Flüsse aus, die schon seit langem korrigiert sind und Hochwasserschutzdämme aufweisen. Als Beispiel kann die *Maggia bei Locarno* erwähnt werden. Sie trat am 7. Aug. 1978 über die Ufer und verursachte Schäden von mehreren hundert Millionen Franken, obwohl sie vorher schon zweimal ausgebaut worden war. Ihre flussbauliche Entwicklung lässt sich wie folgt skizzieren:

- Ende 19. Jahrhundert: Ausbau auf 1800 m^3/s
- 24. September 1924: Hochwasserabfluss von rund 4000 m^3/s mit verheerenden Überschwemmungen
- Ende 20er Jahre bis 1930: Ausbau auf 4000 m^3/s
- 7. August 1978: Hochwasserabfluss von rund 5000 m^3/s mit verheerenden Überschwemmungen
- Seit 1978 bis heute: Ausbau auf 5000 m^3/s.

Wie geht diese Entwicklung weiter? Stellen die am 7. Aug. 1978 abgeflossenen 5000 m^3/s einen oberen Grenzwert dar? Gibt es überhaupt einen solchen Grenzwert?

Solche Fragen stellen sich grundsätzlich auch bei anderen Flüssen. Sie führen zum Problem des höchstmöglichen Hochwassers.

Bestimmungsmethoden

Die Frage nach dem höchstmöglichen Hochwasser setzt voraus, dass es ein solches Hochwasser gibt, und übergeht damit eine Hypothese, die heute weit verbreitet ist: «Jedes Hochwasser kann durch ein anderes von geringerer Wahrscheinlichkeit übertroffen werden.» Die Frage geht davon aus, dass der Abfluss in einem Bach oder Fluss grundsätzlich begrenzt ist, also einen oberen Grenzwert aufweist. Sie stützt sich dabei auf die Einsicht, dass der Hochwasser erzeugende Niederschlag nicht beliebig gross sein kann, weil die Atmosphäre der Erde endliche Ausmasse aufweist und nur eine endliche Wasserdampfmenge aufnehmen kann.

Für die Bestimmung des höchstmöglichen Hochwassers wurden mehrere Methoden vorgeschlagen. Hinweise darauf finden sich in der Literatur unter den Stichworten *«Maximum Possible Flood»* und *Probable Maximum Flood (PMF)»*. Der erste Begriff wurde bis etwa Mitte der fünfziger Jahre verwendet, der zweite ist der heute gebräuchliche. Vom Corps of Engineers der Vereinigten Staaten stammt folgende Definition [1]: «Das vermutlich grösste Hochwasser ist dasjenige, das aufgrund der ungünstigsten Kombination der in einer Region denkbaren kritischen meteorologischen und hydrologischen Bedingungen zu erwarten ist». Damit kommt zum Ausdruck, dass das vermutlich grösste Hochwasser aus dem vermutlich grössten Niederschlag – in englisch *«Probable Maximum Precipitation (PMP)»* – abgeleitet wird. Dieser Niederschlag ergibt sich nach [2] «durch Maximierung des Feuchtigkeitsgehaltes, der mit der maximal möglichen Windgeschwindigkeit über das Einzugsgebiet strömenden Luftmassen und durch das grösstmögliche Ausfallverhältnis des Niederschlages».

Leider erweist es sich als sehr schwierig, eine solche Grenzbetrachtung realistisch durchzuführen. Deshalb stützt man sich bei einigen Methoden auf die *Hüllkurven* von tatsächlich gemessenen Ereignissen und transponiert diese auf das interessierende Einzugsgebiet. Beispielsweise trägt man die höchsten in der umliegenden Region gemessenen Niederschläge in Funktion der Regendauer auf und zeichnet die zugehörige Hüllkurve, oder man stellt die höchsten in der Region ermittelten Gebietsniederschläge in Funktion der Gebietsgrösse dar und entwirft eine andere Hüllkurve [1]. Das vermutlich grösste Hochwasser resultiert dann aus einer Auswertung solcher Hüllkurven und verdient dementsprechend seinen Namen nur bedingt: Es stellt eher einen *empirischen Grenzwert* dar als einen absoluten. In anderen Worten: Das vermutlich grösste bzw. das höchstmögliche Hochwasser (bzw. der höchstmögliche Niederschlag) bleibt aufgrund der erwähnten Methoden eine unbekannte Grösse. Die anderen Methoden liefern mangels Kenntnis der massgeblichen meteorologischen und hydrologischen Gegebenheiten ebenfalls keinen zuverlässigen Anhaltspunkt.

Hüllkurven in Funktion des Einzugsgebietes

Wenn man schon – wie dies im vorangehenden Abschnitt im Zusammenhang mit der Bestimmung des grösstmöglichen Niederschlags erwähnt wird – zu Hüllkurven von gemessenen abflussbildenden Ereignissen greift, kann man ebenso gut die Hüllkurven der Abflüsse selbst betrachten. Der Umweg über die Auswertung der abflussbildenden Ereignisse ist nur dort notwendig, wo keine Abflussmessungen verfügbar sind.

Liegen aus der Region des interessierenden Einzugsgebietes viele Abflussmesswerte und insbesondere Hochwasseraufzeichnungen vor, so kann man die höchsten Hochwasserspitzen in Funktion der Grösse des Einzugsgebietes auftragen und die zugehörige Hüllkurve zeichnen. Man hat dann einen ebenso gut begründeten Anhaltspunkt für den empirischen Grenzwert der Hochwasser wie bei der Verwendung von Hüllkurven der Niederschläge oder der niederschlagsbildenden Ereignisse.

Um die Hüllkurve der Hochwasserspitzen zu finden, geht man wie folgt vor: Die an den verschiedenen Abflussmessstellen einer Region registrierten Höchstwerte werden in Funktion der zugehörigen Einzugsgebietsgrösse in einem Diagramm zusammengefasst. Dabei wird ein doppelt-logarithmischer Massstab gewählt, und die Hochwasserspitzen werden nicht direkt, sondern wie dies allgemein üblich ist, als *spezifische Höchstabflüsse* – d.h. als Hochwasserspitzen pro km^2 Einzugsgebiet – aufgetragen. Werte von Messstellen längs eines bestimmten Flusses können durch einen Linienzug verbunden werden. Auf diese Weise erhält man ein Gewirr von Punkten bzw. Linienzügen, das leicht durch eine Hüllkurve eingegrenzt werden kann. Diese Kurve definiert den empirischen Grenzwert der spezifischen Höchstabflüsse in der betrachtenden Region.

Es ist naheliegend, eine solche Hüllkurve durch eine Formel zu beschreiben. Für viele Regionen findet man im dopplt-logarithmischen Massstab eine Gerade, die der Beziehung

$q_{max} = CE^n$

gehorcht, wo

q_{max} = empirischer Grenzwert des spezifischen Höchstabflusses in $m^3/s\,km^2$

E = Grösse des Einzugsgebietes, in km^2

C, n = Parameter der Hüllkurve

Diese Beziehung liegt mehreren sogenannten empirischen Hochwasserformeln zugrunde, in denen der Parameter n meistens den Wert minus ein Zweitel bis minus ein Drittel annimmt. In der Schweiz sind vor allem die Formeln von Hofbauer, Kürsteiner und Melli im Umlauf [3]. Es gibt aber auch anders aufgebaute Beziehungen, beispielsweise solche, die auf mehr als zwei Parametern beruhen.

Selbstverständlich kann man im Diagramm anstelle der beobachtenden spezifischen Höchstabflüsse die aus längeren Messreihen errechneten statistischen Extremwerte eintragen, wie etwa die hundert- oder tausendjährlichen Höchstabflüsse. Die zugehörige Hüllkurve liefert dann einen Grenzwert von Hochwassern vergleichbarer Überschreitungswahrscheinlichkeit.

Spezifische Höchstablüsse schweizerischer Flussgebiete

Das Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau hat sämtliche in der Schweiz beobachteten Höchsthochwasser zusammengetragen und nach verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet. Die entsprechende Veröffentlichung [4] enthält unter anderem für jedes grössere Flussgebiet eine Darstellung der spezifischen Höchstabflüsse in Funktion des Einzugsgebietes. Als Hüllkurve für die ganze Schweiz, exklusive Tessin, wird eine Gerade angegeben. Die zugehörige Beziehung

$q_{max} = 42\ E^{-0,5}$

ist die *Hochwasserformel von Hofbauer* mit dem von ihm für steiles Gebirgsland empfohlenen (und höchsten) Parameter $C = 42$.

Daneben werden für viele Messstationen die empirischen Überschreitungswahrscheinlichkeiten der Hochwasser graphisch wiedergegeben und mit sechs verschiedenen Verteilfunktionen approximiert. Als besonders anschmiegsam erweist sich die *dreiparametrige Verteilfunktion nach Galton*, die deshalb für die Bestimmung der hundert- – und unter Vorbehalt – der tausendjährlichen Hochwasser empfohlen wird. Die zu den hundertjährlichen Werten gehörenden spezifischen Abflüsse werden ebenfalls in Funktion des Einzugsgebietes dargestellt, allerdings ohne dass eine Hüllkurve definiert wird.

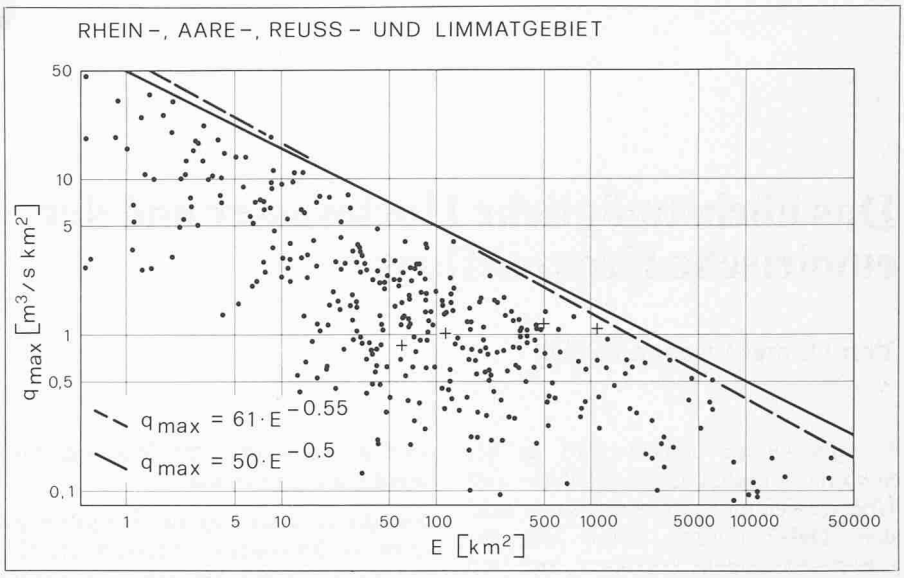

Bild 1. Schweizerisches Rheingebiet. Abhängigkeit der beobachteten spezifischen Höchstabflüsse von der Fläche des Einzugsgebietes. Punkte nach [4]. Kreuze für die Werte der Langeten 1975 und der Thur 1978

Rheingebiet

Gestützt auf die erwähnte Veröffentlichung des Eidg. Amtes für Strassen- und Flussbau werden in Bild 1 die spezifischen Höchstabflüsse des Rheingebietes *inklusive Aare-, Reuss-, und Limmatgebiet* wiedergegeben. Es handelt sich um sämtliche bis zum Jahr 1969 beobachteten Höchstwerte, das heisst um über 400 Werte, ergänzt durch vier später aufgetretene Extremereignisse: Die *Maxima der Langeten* in *Huttwil* und *Lotzwil* vom 30.8.75 und die *Maxima der Thur* in *Jonschwil* und *Halden* vom 8.8.78.

Als Hüllkurve kann im doppelt-logarithmischen Massstab eine Gerade eingezeichnet werden, die sich durch die Beziehung

$q_{max} = 61\ E^{-0,55}$

beschreiben lässt. Im Sinne einer Vereinfachung der Parameter und bei Vernachlässigung eines einzigen aufgetragenen Punktes kann diese Gerade durch eine andere mit

$q_{max} = 50\ E^{-0,5}$

ersetzt werden. Diese Beziehung stellt den empirischen Grenzwert der Hochwasser in Einzugsgebieten von 5 bis etwa 10000 km^2 dar.

Rhonegebiet

Auf ähnliche Weise sind in Bild 2 die spezifischen Höchstabflüsse des Rhonegebietes in Funktion des Einzugsgebietes wiedergegeben. Es handelt sich um sämtliche – und zwar um 70 – bis zum Jahre 1969 beobachteten Höchstwerte. Als Hüllkurve kann die Gerade mit der Beziehung

$q_{max} = 20\ E^{-0,5}$

eingezeichnet werden. Sie steht für den Grenzwert der Hochwasser in Einzugsgebieten von 5 bis 10000 km^2.

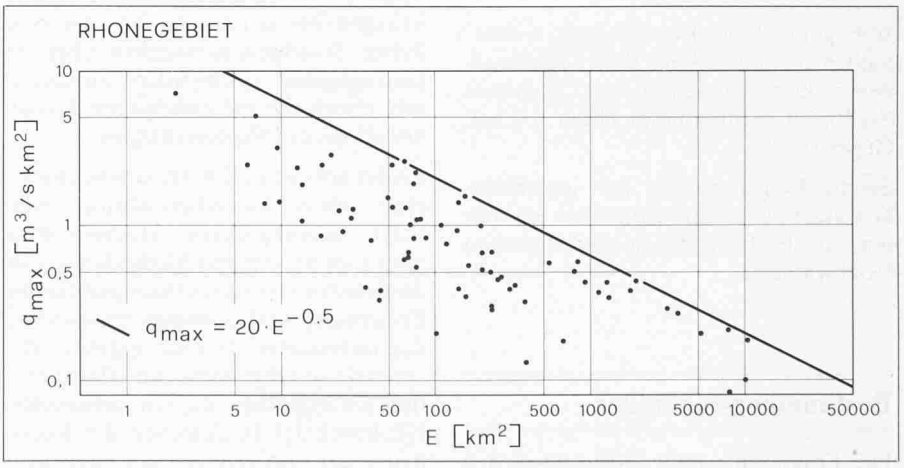

Bild 2. Schweizerisches Rhonegebiet. Abhängigkeit der beobachteten spezifischen Höchstabflüsse von der Fläche des Einzugsgebietes. Punkte nach [4]

Tessin- und Addagebiet

Analog zu den Bildern 1 und 2 sind in Bild 3 die spezifischen Höchstabflüsse – es sind nahezu 50 – der bis 1969 beobachteten Hochwasser des Tessin- und Addagebietes in Funktion des Einzugsgebietes festgehalten. Zusätzlich sind fünf Extremwerte eingetragen, die anlässlich des verheerenden Hochwassers vom 7.8.78 ermittelt worden sind: die *Maxima der Melezza* in *Camedo, Palagnedra* und *Intragna* und die *Maxima der Maggia* in *Ponte Brolla* und *Locarno*.

Die Streuung der Punkte erschwert das Zeichnen einer Hüllkurve. Betrachtet man einzig die Werte der Melezza und der Maggia vom 7.8.78, so kann man eine Gerade von der Form

$$q_{max} = 190\ E^{-0,5}$$

ziehen; sie ist aber bloss für Einzugsgebiete im Bereich von 100 bis 1000 km² abgesichert.

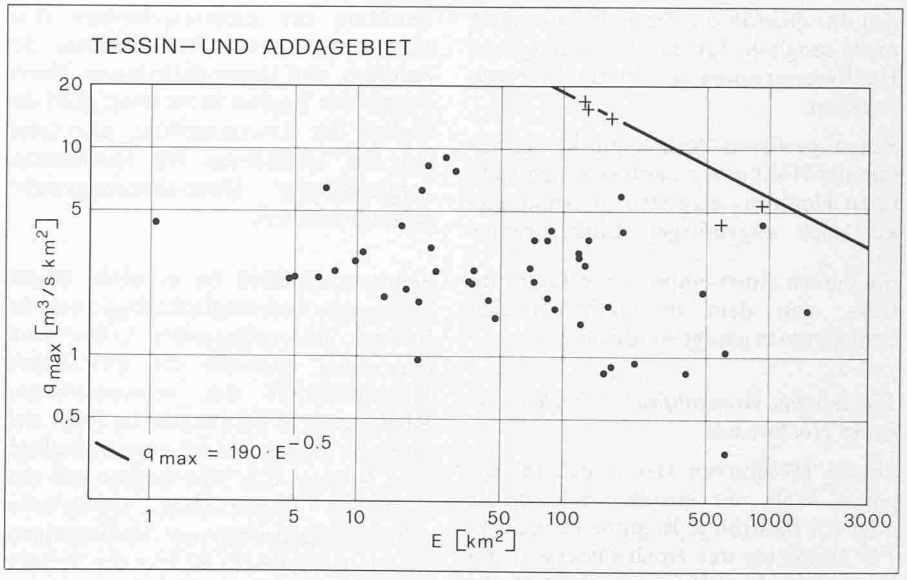

Bild 3. Schweizerisches Tessin- und Addagebiet. Abhängigkeit der beobachteten spezifischen Höchstabflüsse von der Fläche des Einzugsgebietes. Punkte nach [4], Kreuze für die Werte der Melezza und der Maggia 1978

Vergleich der spezifischen Höchstabflüsse

Für die Hüllkurven der spezifischen Höchstabflüsse in schweizerischen Flussgebieten können zusammenfassend folgende Beziehungen angegeben werden

(q_{max} in m³/s km², E in km²):

- Rheingebiet
  $q_{max} = 50\ E^{-0,5}$ für $5 < E < 10000$
- Rhonegebiet
  $q_{max} = 20\ E^{-0,5}$ für $5 < E < 10000$
- Tessin- und Addagebiet
  $q_{max} = 190\ E^{-0,5}$ für $100 < E < 1000$

Der Vergleich dieser Beziehungen zeigt zweierlei: Die Grenzwerte im Tessin- und Addagebiet – d.h. insbesondere die der Maggia und der Melezza – sind fast viermal höher als jene im Rheingebiet, und diese sind wiederum rund 2,5mal höher als jene im Rhonegebiet. Diese beträchtlichen Unterschiede sind vor allem auf die *klimatischen Gegebenheiten* zurückzuführen, welche die unterschiedliche geographische Lage der drei Flussgebiete im Alpenraum wiederspiegeln

Die angeführten Beziehungen sind nur aus den Hüllkurven der *beobachteten* spezifischen Höchstabflüsse ermittelt worden. Sie umschliessen interessanterweise aber auch die erwähnten, in [4] angegebenen hundertjährlichen spezifischen Höchstabflüsse.

Die grössten spezifischen Abflüsse der Welt

Bild 4 enthält eine Zusammenstellung von spezifischen Höchstabflüssen der Welt [5] und der Vereinigten Staaten [6], ergänzt durch eine aufgrund von 600 Werten ermittelte Hüllkurve von *Wundt* [7]. Aus dieser Kurve lassen sich die empirischen Grenzwerte der Weltspitzen entnehmen.

Die ebenfalls in Bild 4 eingetragenen Hüllkurven für die in Abschnitt «Spezifische Höchstabflüsse ...» betrachteten schweizerischen Flussgebiete zeigen, dass die schweizerischen Grenzwerte weit unter denen der Welt liegen. Einzig die Grenzwerte des Tessin- und Addagebietes bzw. der Maggia und der Melezza kommen den Weltspitzen nahe. Diese liegen aber doch um den Faktor 1,5 bis 2 höher; die Darstellung im doppeltlogarithmischen Massstab täuscht eine kleine Differenz vor. Hinsichtlich der spezifischen Höchstabflüsse ist die Schweiz somit nicht Weltrekordhalter.

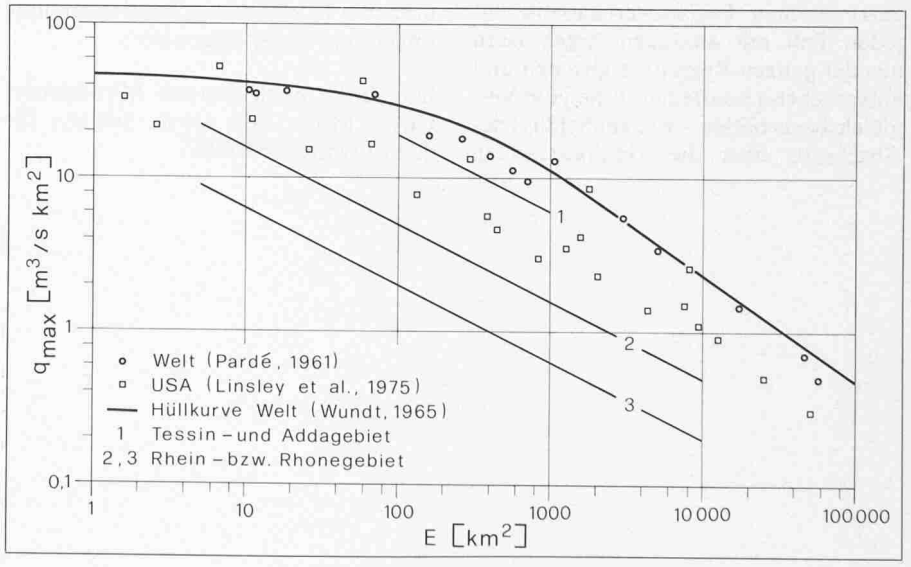

Bild 4. Spezifische Höchstabflüsse der Welt nach [5, 6, 7] im Vergleich zu den Hüllkurven der spezifischen Höchstabflüsse der Schweiz gemäss den Bildern 1, 2 und 3

Schlussfolgerungen

Weil die Voraussetzungen für die Niederschlagsentstehung in der Atmosphäre der Erde endlich sind, sind die Niederschläge grundsätzlich begrenzt. Folglich sind auch die durch Niederschläge hervorgerufenen Hochwasser begrenzt. Für jedes Einzugsgebiet gibt es somit einen Grenzabfluss, den man als höchstmögliches Hochwasser bezeichnen kann. Leider erlauben es die heutigen Kenntnisse der niederschlags- und abflussbildenden Prozese nicht, die entsprechenden Grenzwertberechnun-

gen durchzuführen. Deshalb ist es auch nicht möglich, für das höchstmögliche Hochwasser einen gesicherten Wert anzugeben.

Einen gewissen Anhaltspunkt vermitteln die Hüllkurven der bisher beobachteten Hochwasserspitzen in Abhängigkeit zum zugehörigen Einzugsgebiet.

Sie liefern einen empirischen Grenzabfluss, von dem in mathematischer Schreibweise gesagt werden kann:

Empirischer Grenzabfluss $\leq$ *höchstmögliches Hochwasser.*

Solche Hüllkurven lassen sich für die ganze Welt, für einzelne Kontinente oder für bestimmte Regionen zeichnen. Für Probleme des Hochwasserschutzes längs eines Flusses ist es angezeigt, die Hüllkurve der Region zu betrachten, zu der das Einzugsgebiet in hydrologischer Hinsicht gehört. Eine Verengung des Blickwinkels auf das Einzugsgebiet allein ist nicht zu empfehlen; sie würde einigen wenigen Einzelbeobachtungen zu viel Gewicht beimessen.

Es ist heute üblich, als Bemessungsabfluss für eine Hochwasserschutzmassnahme ein Hochwasser geringer Überschreitungswahrscheinlichkeit - also etwa ein hundert - oder ein tausendjährliches Hochwasser - zu wählen. Die zugehörige *Extremwertstatistik* stützt sich dabei meistens auf eine einzige Messstelle am auszubauenden Fluss und lässt das übrige Geschehen in der hydrologischen Region ausser acht. Diese Betrachtungsweise ist zu einseitig und zu eng. Man sollte die Ergebnisse einer solchen Extremwertstatistik auf jeden Fall mit analogen Ergebnissen aus der ganzen Region vergleichen und entsprechend beurteilen. Eine gute Vergleichsbasis bilden - wie am Schluss des Abschnitts über die «Hüllkurven in Funktion des Einzugsgebietes» skizziert - die spezifischen Abflüsse der hundert- und tausendjährlichen Hochwasser der Region in Abhängigkeit der Grösse der Einzugsgebiete, also letztlich die Hüllkurven der Hochwasser vergleichbarer Überschreitungswahrscheinlichkeiten.

Selbstverständlich ist es nicht immer leicht, eine hydrologische Region zu definieren. Im vorliegenden Artikel wurden unter anderem die spezifischen Höchstabflüsse des schweizerischen Rheingebietes dargestellt. Es fragt sich aber, ob dieses Gebiet eine hydrologische Region, d.h. eine Region mit einheitlichen klimatischen, topographischen, geologischen usw. Bedingungen darstellt. Vielleicht liefern die Teileinzugsgebiete des Alpen-Rheins, der Limmat, der Reuss und der Aare geschlossenere Bilder; vielleicht muss zwischen dem Gebiet der Alpen, der Voralpen, des Mittellandes und des Juras unterschieden werden; vielleicht sind als Parameter ausser der Einzugsgebietsgrösse noch andere Gebietscharakteristiken sowie insbesondere die Vergletscherung und die Seeretention zu berücksichtigen; vielleicht gibt es weitere Kriterien, nach denen das Rheingebiet aufgeteilt werden sollte. Wie bereits bemerkt, darf aber die mit einer solchen Aufteilung verbundene Verengung des Blickwinkels nicht dazu führen, dass zuletzt nur noch das Einzugsgebiet des auszubauenden Flusses oder bloss eine einzige Messstelle an diesem Fluss betrachtet wird. Das könnte dazu führen, dass die Hochwassergefahr krass unterschätzt und eine Hochwasserschutzmassnahme ungenügend ausgelegt wird.

Ich danke noch meinen Mitarbeitern Ulrich Moser und Anton Schleiss für den Entwurf der Bilder.

Literaturverzeichnis

[1] *Riedel J.T.:* «Assessing the probable maximum flood». Water Power and Dam Construction. December 1977

[2] *Mosonyi E., W. Buck:* «Die Auswahl des Bemessungshochwassers». Wasserwirtschaft, Jg. 66, H. 7/8, 1976

[3] *Vischer D., A. Huber:* «Wasserbau», 2. Auflage, S. 30. Springer Berlin, Heidelberg, New York, 1979

[4] Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau: Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern. Eigenverlag, 1974

[5] *Pardé, M.:* «Sur la puissance des crues en diverses parties du monde». Geographica, numero monografico, anno VIII, Zaragoza, 1961

[6] *R.K. Linsley, M.A. Kohler, J.L.H. Paulhus:* «Hydrology for Engineers». Second Edition, McGraw Hill, Tokio, 1975

[7] *Wundt, W.:* «Grenzwerte der Hochwasserspende und der mittleren Abflussspende in Abhängigkeit von der Fläche». Die Wasserwirtschaft, 55. Jg., H. 1, Januar 1965

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *D. Vischer,* Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

Auszug aus dem Vortrag über «Hochwasser in der Schweiz; Ausmass und Häufigkeit», gehalten an der Fachtagung über Hochwasserschutz vom 27./28.3.80 an der ETH Zürich.