

| | |
|---------------------|--|
| Zeitschrift: | Schweizerische Bauzeitung |
| Herausgeber: | Verlags-AG der akademischen technischen Vereine |
| Band: | 89 (1971) |
| Heft: | 24: 2. Sonderheft zum 70. Geburtstag von Prof. Dr. Charles Jaeger |
| Artikel: | Die Häufigkeitsanalyse extremer Niederschläge und Abflüsse als Planungsgrundlage im Wildbachverbau |
| Autor: | Zeller, Jürg |
| DOI: | https://doi.org/10.5169/seals-84879 |

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: 13.01.2026

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

Die Häufigkeitsanalyse extremer Niederschläge und Abflüsse als Planungsgrundlage im Wildbachverbau

Von J. Zeller, dipl. Ing., Birmensdorf ZH

DK 627.141

1. Einleitung

Im Wildbachverbau steht man immer wieder vor der Frage, welche Wasser- und Geschiebeführung einer Verbauung als Bemessungsgröße zugrundegelegt werden soll. Häufig ist nicht einmal deren Größenordnung bekannt. Wohl gibt es empirische Gleichungen, die scheinbar erlauben, solche Größen zu bestimmen. Ihre Zuverlässigkeit ist aber meist sehr bescheiden. Nachfolgend sollen einige Elemente der Wasserführung im Hinblick auf das Dimensionierungs-Hochwasser kurz behandelt werden. Wir beschränken uns dabei ausschließlich auf den Wasseraufschwund und lassen die Geschiebeführung beiseite. Ebenso wird auf die zulässige Überschreitungshäufigkeit eines Dimensionierungs-Hochwassers nicht eingetreten.

Für extreme Abflüsse sind in der Regel massgebend: Niederschlag (mit und ohne Zwischenakkumulation in Form von Schnee und Eis), Topographie, Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens und Vegetation. Andere Faktoren spielen in diesem Zusammenhang eine untergeordnete Rolle. Um eine Prognose über extreme Abflüsse stellen zu können, sind deshalb vor allem Niederschlagsanalysen notwendig, falls man sich nicht direkt auf Abflussmessungen stützen kann. Häufig stehen Messdaten über Perioden beschränkter Dauer zur Verfügung. Solche Perioden sind aber meist zu kurz, um eine direkte Aussage über die Häufigkeit des Auftretens extremer Niederschlags- oder Abflusswerte zu machen. Man verwendet deshalb in der Ingenieur-Hydrologie verschiedene Verfahren, die erlauben, durch Extrapolation aus zu kurzen Messperioden auf die gewünschten Extremwerte zu schließen. Sie sind unter dem Namen *Frequenzanalysen* bekannt. Eine solche Analyse wird den nachfolgenden Betrachtungen zugrundegelegt. Einfachheitshalber sei das Verfahren von *E. J. Gumbel* verwendet [1], welches bei uns wohl am besten eingeführt ist. Über die verschiedenen Verfahren besteht eine reichhaltige Literatur, so dass hier auf eine Erläuterung der statistischen Probleme sowie der Gültigkeitsgrenzen verzichtet werden kann [1], [2], [9]¹⁾. Die grundsätzlichen Ergebnisse sind ohnehin praktisch unabhängig vom verwendeten Verfahren²⁾.

Nachfolgend soll auf die vielen Möglichkeiten der Verwendbarkeit solcher statistischer Methoden hingewiesen und deren Brauchbarkeit am Beispiel von Starkregen, Schneeschmelze und Hochwasserabfluss gezeigt werden. Gleichzeitig werden ebenfalls an Beispielen einige für die Verbaupraxis verwertbare Folgerungen gezogen. Es ist noch zu erwähnen, dass in der Schweiz derartige Starkregenanalysen bis heute nur in Ausnahmefällen durchgeführt wurden, die Schneeschmelze noch kaum je derart untersucht worden ist, und bei den Abflüssen meist nur die Hochwasserspitzen analysiert werden.

¹⁾ Siehe Anhang: «Praktisches Vorgehen bei der Frequenzanalyse nach Gumbel».

²⁾ Quantitative Unterschiede zwischen den einzelnen Verfahren sind meist erst bei Wiederkehrperioden von weniger als zehn Jahren spürbar.

2. Starkregen

Dank eines ausgedehnten Netzes von Niederschlagsmessstellen vor allem der Schweiz. Meteorologischen Zentralanstalt (SMZ) [3] stehen uns gemessene Daten eines jeden Tages über viele Jahre zur Verfügung. In Bild 1 sind die Größtwerte einer Messperiode von 70 Jahren für einige ausgewählte Messstellen wiedergegeben. Bern zeigt zum Beispiel bei einer Wiederkehrperiode von hundert Jahren eine Niederschlagsmenge von rund 100 mm/Tag, d. h. dieser Wert wird innerhalb von hundert Jahren einmal erreicht oder überschritten. Es ist dies ein sog. hundertjähriger Starkregen³⁾. Bild 1 gilt für ein Messintervall von 24 Stunden⁴⁾. Entsprechende Diagramme können auch für kürzere oder längere Messintervalle aufgestellt werden. Die Ergebnisse dieser verschiedenen Einzeldiagramme werden in einem Gesamtdiagramm (Bild 2) zusammengestellt. Grundsätzlich geht daraus hervor, dass die zu erwartenden extremen Starkregenintensitäten um so grösser sind, je kürzer das Messintervall ist. Der geradenähnliche Verlauf wird von den über zwanzig in dieser Hinsicht ausgewerteten Messstellen bestätigt. Ähnliche Ergebnisse sind aus den USA, der UdSSR und anderen Ländern bekannt. Häufig interessieren die Niederschlagsintensitäten noch kleinerer Messintervalle als ein Tag, wofür aber in der Regel Messdaten fehlen. Die wenigen zur Verfügung stehenden Er-

³⁾ Eine Untersuchung von über 50 Messstellen in den Voralpen und Alpen lässt erkennen, dass dort, wo extreme Gewitterregen für die Jahresextremwerte massgebend sind, für die Abszisse, entsprechend Bild 1, zweckmässigerweise der logarithmische Massstab gewählt wird. In gewitterarmen Gebieten ist dagegen die lineare Auftragung vorzuziehen.

⁴⁾ S. Anhang: «Kalendarische Einteilung».

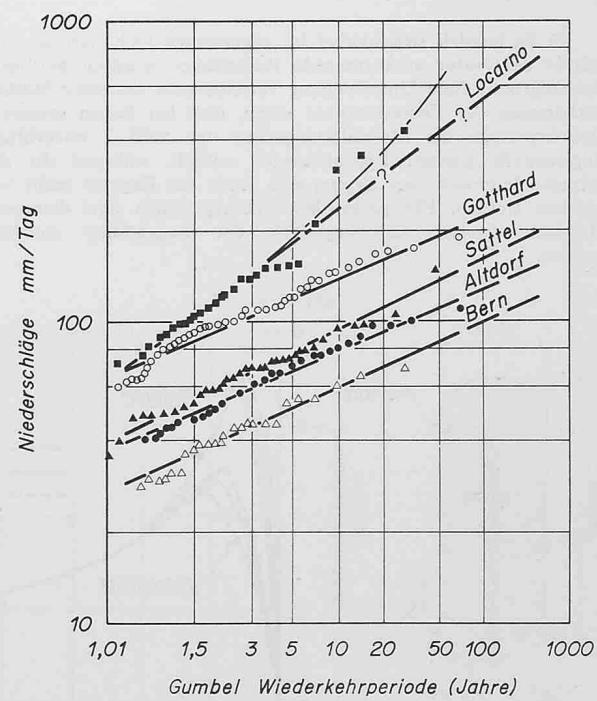


Bild 1. Frequenzanalyse nach Gumbel für Tagesstarkregen (die Geraden wurden von Auge eingepasst)

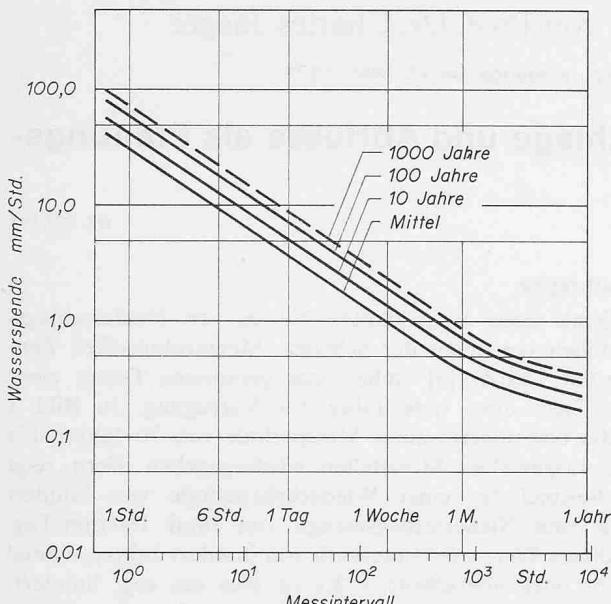


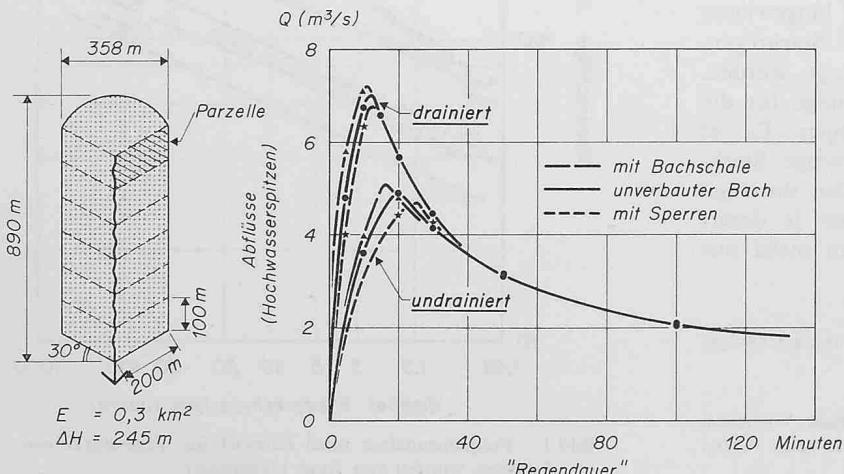
Bild 2. Regenintensitäten in Abhängigkeit von der Grösse des Messintervalls für Andermatt. Messperiode 1901/1968 (unter «Mittel» ist das statistische Mittel der Jahresgrösswerte mit einer Wiederkehrperiode von 2,33 Jahren zu verstehen). Bild 1 entspricht den Punkten bei einem Messintervall von einem Tag

hebungen [4] lassen erkennen, dass die Regenintensität mit abnehmender Messintervallgrösse immer weniger zunimmt, d. h. die Geraden in Bild 2 gehen in Kurven über. Diese Abweichung von der Geraden kann schon bei zwei und mehr Stunden beginnen. In Bild 2 (Andermatt) beginnt die Krümmung kurz nach einer Stunde.

An einem einfachen Rechenbeispiel soll gezeigt werden, wie Bild 2 für die Bestimmung des Hochwasserabflusses verwertet werden kann. Benutzt wird ein einfaches hydrologisches Modell mit folgenden Vereinfachungen:

- Die in Bild 2 angegebenen mittleren Regenintensitäten werden als eine genügend genaue Wiedergabe der Starkregenverhältnisse im betreffenden Einzugsgebiet betrachtet, und die Messintervallgrösse wird der Regendauer⁵⁾ gleichgesetzt

⁵⁾ Es handelt sich hierbei im allgemeinen nicht um die tatsächlich in der Natur vorkommende Regendauer, sondern nur um eine Rechengrösse. Eine Untersuchung verschiedener extremer Starkregenvorkommen der Zentralschweiz zeigte, dass bei Regen grosser Wiederkehrperiode die Messintervallgrösse von Bild 2 tatsächlich die Regenanteile grösster Regenintensität enthält, während die Anteile geringer Intensität (bei Beginn und Ende des Regens) nicht wiedergegeben werden. Für grosse Wiederkehrperioden darf demnach die Messintervallgrösse näherungsweise der Regendauer gleichgesetzt werden.



- Die Berechnung wird über das ganze Einzugsgebiet als gleichmässig verteilt, gleich intensiv und gleichlang andauernd angenommen
- Die Abflussganglinien des gerinnelosen Abflusses aus den Teileinzugsgebieten (Parzellen) werden näherungsweise durch gleichschenklige Dreiecke bzw. Trapeze dargestellt
- Die Wasserverluste (zum Beispiel Versickerungsverluste) werden als über die ganze Abflussdauer und das ganze Einzugsgebiet konstant angenommen.

Diese Vereinfachungen haben sich für die geprüften Kleineinzugsgebiete als annehmbar erwiesen. Es sei in diesem Zusammenhang vor allem auf die amerikanische Literatur verwiesen [5]. Dabei kann man feststellen, dass zur Erreichung eines Höchstabflusses der Regen zumindest solange andauern muss, bis auch das Wasser aus dem entlegendsten Teil des Einzugsgebietes in voller Intensität an der Messstelle eintrifft. Die Zeit, die das Wasser benötigt, um bis zur Messstelle zu gelangen, heisst *Laufzeit*. Sie ist ein wesentlicher Parameter des Wasserabflusses. Von ihr entfällt der grösste Teil in unseren Kleineinzugsgebieten auf den Abfluss über die freie Bodenoberfläche, dem so genannten gerinnelosen Abfluss⁶⁾. Demgegenüber ist der Laufzeitanteil in Gerinnen (Bächlein und Bächen) verhältnismässig klein⁷⁾. Zusammen mit der pro Flächeneinheit gefallenen sekundlichen Regenmenge⁸⁾, den Wasser- verlusten (Abflusskoeffizient) und der Laufzeit gelingt es, die zeitliche und mengenmässige Entwicklung des Hochwasserabflusses, d. h. die «Hochwasserganglinie» zu berechnen. Die Rechnung ist einfach, jedoch zeitraubend und für den Einsatz eines Computers geeignet. Für die verschiedenen Regenintensitäten bzw. «Regendauern» wurden solche Ganglinien bestimmt. Diejenige mit der grössten Abflussspitze ist für die Bemessung massgebend.

Das Ergebnis der Rechnung ist in Bild 3 zusammengestellt. Aufgetragen sind die einzelnen Werte der Hochwasserspitzen in Abhängigkeit von der «Regendauer». Es zeigt sich eindeutig eine mit wachsender «Regendauer» vorerst rasch zunehmende Hochwasserspitze, welche einen Maximalwert erreicht und hierauf wieder abfällt. Beim undrainierten Einzugsgebiet mit unverbautem Bach ergibt sich in Bild 3 die maximale Abflussspitze bei der «kritischen Regendauer» von etwa zwanzig Minuten. Diese ist demnach bei derart kleinen Einzugsgebieten kürzer als eine Stunde. Dementsprechend rechnet man für Einzugsgebiete kleiner als 50 km² mit maximal 2 bis 3 Stunden Laufzeit (bzw. «kritischer Regendauer»).

6) S. Anhang: «Gerinneloser Abfluss».

7) S. Anhang: «Gerinneabfluss».

8) S. Anhang: «Wasseranfall aus Regen».

Bild 3. Rechenbeispiel. Links: Schema des Einzugsgebietes, rechts: Hochwasserspitzen in Abhängigkeit von der «Regendauer» für undrainiertes und drainiertes Einzugsgebiet mit unverbautem bzw. verbautem Bachgerinne

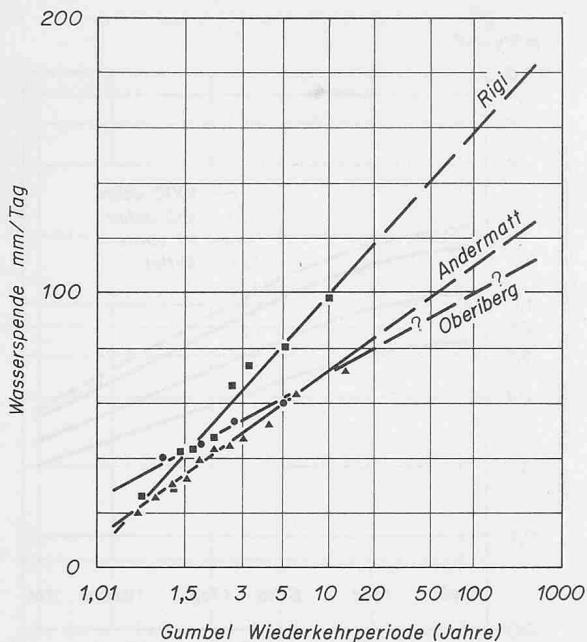


Bild 4. Frequenzanalyse nach Gumbel für die Schneeschmelze über ein Messintervall von drei Tagen

Natürlich hängt dieser Wert u. a. stark von Form und Gefälle des Einzugsgebietes und den Gerinneverhältnissen ab. Verbaut man zum Beispiel das Gerinne, so ändert sich die Laufzeit und damit die «kritische Regendauer». Ist der Bach sperrenverbaut, so nimmt unter gleichen Niederschlagsbedingungen das Höchsthochwasser ab. Ist er dagegen schalenverbaut, so wird es grösser. Die Unterschiede liegen meist innerhalb der Genauigkeitsgrenze der Bestimmung des Höchsthochwassers. Drainiert man das Einzugsgebiet mit Hilfe eines offenen Entwässerungssystems (Schalen), so verringern sich die Laufzeiten des gerinnelosen Abflusses ganz wesentlich (kürzere Wegstrecken), und entsprechend erhöhen sich die Abflussspitzen. Die beiden in Bild 3 wiedergegebenen Kurvenscharen sind als Extremwerte zwischen sehr stark drainiert und nicht drainiert zu betrachten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass man von dergesten Erhebungen, wenn sie sorgfältig durchgeführt werden, qualitativ gute Ergebnisse erwarten darf. Da das Messstellennetz meist weitmaschig ist, werden deshalb in der Regel mehrere Messstellen in die Betrachtung miteinbezogen. Dies ist um so notwendiger als im Gebirge die Regenverteilung meist stark unterschiedlich ist. Ohne eingehendes Studium der Niederschlagsverhältnisse, Befragung von Ortsansässigen und bei wichtigen Problemen das Errichten von zusätzlichen Messstellen (Niederschlagsbeschreiber) als Schlüsselmessstellen, ist nicht auszukommen. Des weiteren ist die Qualität der Messstellen von Bedeutung. Was im Flachland leicht zu bewerkstelligen ist, wird im Gebirge häufig problematisch. Solche Niederschlagserhebungen und darauf gründende Abflussberechnungen dürfen, so zweckmäßig sie auch sind, und so guten Einblick sie in den Mechanismus der Hochwasserbildung auch geben, in ihrem Aussagewert nicht überschätzt werden.

3. Schneeschmelze

Wir wissen von stark vergletscherten Kleineinzugsgebieten, dass die grössten Hochwasserabflüsse oft eine Folge der Gletscherschmelze sind. Es soll deshalb festgestellt werden, ob die Schneeschmelze ähnlich grosse Wasserspenden liefert wie die Starkregen oder diese sogar übertrifft. Die nachfolgende Auswertung von Schneeschmelz-

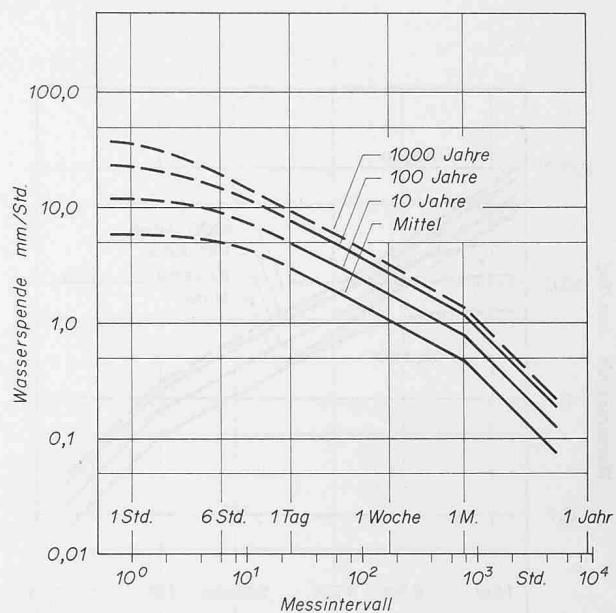


Bild 5. Schneeschmelzintensitäten in Abhängigkeit von der Grösse des Messintervalles für Andermatt

daten erfolgt grundsätzlich gleich wie beim Regen mit Hilfe der Frequenzanalyse. Als Grundlage werden die Schneehöhen- und Schneedichtemessungen des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung [7] verwendet. Aus diesen Werten kann die in der Schneedecke akkumulierte Wassermenge, der sog. Wasserwert bestimmt werden. Die Wasserspende infolge Schneeschmelze ist nichts anderes als die Wasserwertabnahme pro Zeiteinheit. Die Analyse dieser Werte ergibt die Linien von Bild 4. Sie sind denen von Bild 1 sehr ähnlich. Wiederum können verschiedene Messintervallgrössen berücksichtigt und daraus die Kurven von Bild 5 konstruiert werden. Weil die zur Verfügung stehenden Messperioden sehr kurz sind, ist eine Extrapolation auf Wiederkehrperioden von mehr als 50 Jahren wenig ratsam. Ebenfalls fehlen Werte für Messintervalle, die kleiner als ein Tag sind. Die in diesem Bereich eingezeichneten Kurven sind das Ergebnis einer theoretischen Untersuchung möglicher Schmelzwerte.

Von besonderem Interesse ist die Gegenüberstellung von Regen und Schneeschmelzwerten desselben Standortes (Bild 6). Danach zeigt sich am Beispiel von Andermatt, dass bei kleinen Messintervallgrössen (kleiner als ein Tag) die Regenwerte stark überwiegen, wogegen bei grösseren Intervallen die Schneeschmelzwerte grösser sind. Es ist zu präzisieren, dass es sich hier um Werte der Messstelle, also eines Punktes im Gelände handelt. Da die Schneeschmelze in tiefer gelegenen Gebieten wesentlich früher einsetzt als in höher gelegenen, d. h. ein stark ausgeprägter Höheneinfluss vorhanden ist, entsteht in den steilen Einzugsgebieten der Wildbäche eine ins Gewicht fallende Verringerung des Wasserangebotes. Der totale Wasseranfall ist deshalb für eine Fläche je nach Art, Ausdehnung und Höhendifferenz (abgesehen von Exposition usw.), noch wesentlich kleiner als in Bild 6 angegeben. Entsprechend dem Rechenbeispiel nach Bild 3, wonach für Kleineinzugsgebiete nur eine sehr kurze Regendauer massgebend ist, darf man annehmen, dass in unseren Wildbachgebieten der Voralpen und der Alpen die Schneeschmelze als solche in der Regel nicht in die Betrachtung der Höchsthochwasserabflüsse eingeschlossen werden muss. (Dagegen können Schneeschmelzen als Teil der Vorgeschichte eines Hochwasserereignisses unter Umständen von grosser Bedeutung

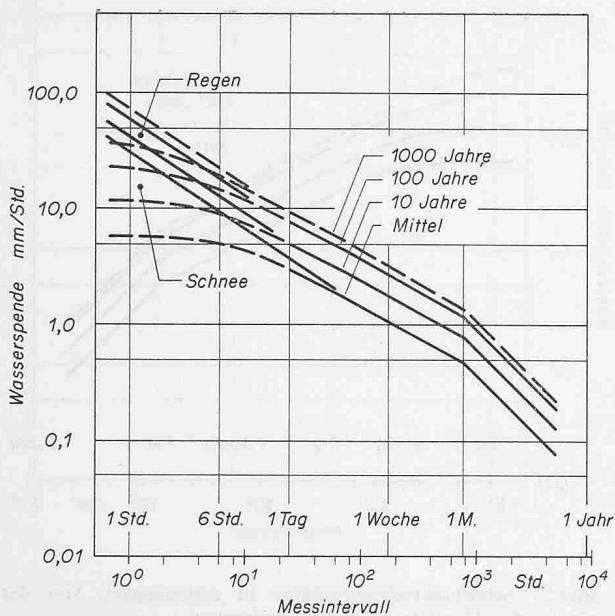


Bild 6. Gegenüberstellung von Starkregen- und Schneeschmelzintensitäten für Andermatt (Punktmessung)

sein.) Mit der Zeit wird es möglich sein, durch das Detailstudium repräsentativer Einzugsgebiete vor allem in den Alpen diese Annahme zu belegen.

In den Bildern 4 und 5 wurde der Einfluss des Föhns auf die Schneeschmelze bzw. auf das Wasserangebot nicht ausgesondert. Er führt je nach Standort zu einer geringen bis stark ausgeprägten Verringerung des Wasseranfalles. Umgekehrt können während der Schneeschmelze auch Regen fallen, besonders während der Ausaperungsphase, die zu einer Erhöhung des Wasserangebotes führen. Diese einander entgegenwirkenden Elemente gleichen sich bei der Frequenzanalyse für Andermatt ziemlich aus.

Das Problem der Schneeschmelze ist nicht so einfach, wie es vielleicht den Anschein macht. Nicht nur ist die Schneeschmelze als solche ein physikalisch sehr komplexes Problem, sondern es fehlen vorderhand noch ein für Abflussprognosen genügend ausgebautes Beobachtungsnetz und genügend lange Messperioden. Auch muss man sich für viele Fälle der Praxis auf weitentferntliegende Messstellen stützen. Man versucht dann, mit Hilfe von Schneehöhen-Stichproben im betreffenden Gebiet und Photos der Ausaperungsphase unter Verwendung der physikalischen Gesetze die Schneeschmelzwerte zu schätzen.

4. Hochwasserabfluss

Direkte Abflussmessungen sind für den Wildbachverbauer am wertvollsten, besonders wenn es sich um langperiodige Messungen handelt. Sie enthalten nicht nur die voraussehbaren, sondern auch die nicht voraussehbaren Hochwasser. Unter voraussehbar ist in diesem Zusammenhang derjenige Abfluss zu verstehen, der ohne Fremdeinflüsse eine direkte Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluss darstellt. Nicht voraussehbar sind dagegen jene, die zum Beispiel durch Rückstau infolge Verklausung, Erdrutschen usw. mit nachfolgendem Wasserausbruch entstehen. Dem anerkannten Vorteil der Direktmessungen stehen aber auch Nachteile gegenüber. In den meist kurzperiodischen Messreihen von Kleineinzugsgebieten kommen solche nicht voraussehbaren Ereignisse nur sporadisch vor. Sie zeichnen sich aus

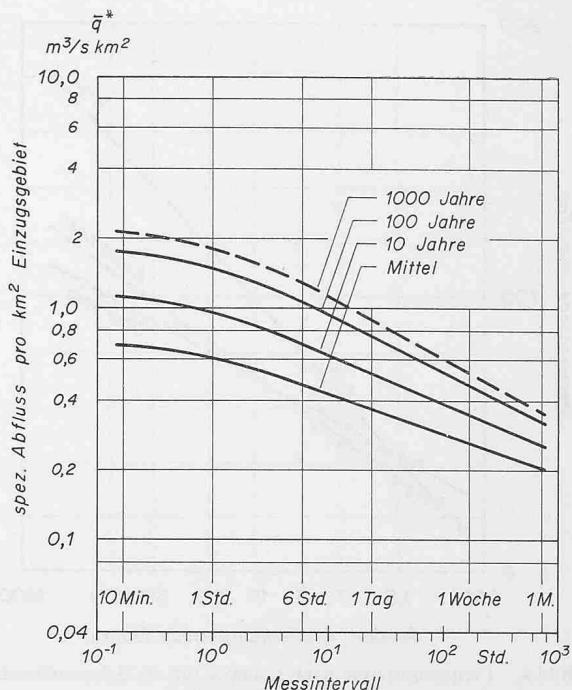


Bild 7. Spezifischer Abfluss \bar{q}^* ($m^3/s \cdot km^2$) in Abhängigkeit von der Grösse des Messintervales am Beispiel der Witenwasserreuss bei Realp. Messperiode 1956/1970, Einzugsgebiet $E = 30,7 \text{ km}^2$

durch sehr grosse Abflusswerte, die in die allgemeine Tendenz der restlichen Messungen nicht passen. Man versucht sie deshalb in der Frequenzanalyse auszuschalten und getrennt zu berücksichtigen. Ein weiterer Nachteil ist das im Wasser mit geführte Geschiebe. Überwertungen der Abflüsse während Hochwasser um 10 bis 20 % sind durchaus möglich. Noch grössere Abweichungen sind bekannt. Man hat deshalb bei Direktmessungen gebührende Vorsicht walten zu lassen. Dessen ungeachtet ist es interessant, die Abflusswerte auch solcher Kleineinzugsgebiete mit Hilfe der Frequenzanalyse zu untersuchen. Wir sind es im Wasserbau, wie einleitend erwähnt, gewöhnt, Tagesspitzen und allfällige Höchstwerte der Tagesmittel auf diese Weise zu prüfen. Auf ein Beispiel dieses Typs soll deshalb verzichtet werden. Hingegen werden bis heute die Abflusswerte in Abhängigkeit von der Messintervallgrösse wenig studiert. Ein entsprechendes Beispiel ist die Witenwasserreuss bei Realp. Die durch das Eidg. Amt für Wasserwirtschaft gemessenen Tagesspitzen sind in Bild 7 bei einer Intervallgrösse von zehn Minuten und entsprechend die Tagesmittelwerte bei einer solchen von 24 Stunden aufgetragen. Kürzere Messintervalle lassen sich mit den dort vorhandenen Installationen nicht bestimmen. Es ist jedoch nicht anzunehmen, dass noch wesentlich grössere Abflusswerte möglich sind. Bei Intervallen grösser als 1000 Stunden zeigt sich ein starker Abfall der Wasserführung, welche möglicherweise mit der Schnee- und Gletscherschmelze zusammenhängt (vgl. Bild 5).

Bild 7 lässt erkennen, dass nicht nur die Grösse des Abflusses als solche bei der Klassierung eines Hochwassers berücksichtigt werden sollte, wie dies üblicherweise getan wird, sondern auch dessen Dauer. So entspricht ein Abfluss von $1,2 \text{ m}^3/s \cdot \text{km}^2$ bei zehnminütiger Dauer (Bild 7) nur einem zehnjährigen Hochwasser, jedoch bei fünfstündiger Dauer bereits einem hundertjährigen Hochwasser. Dass Bild 7 nicht nur für die Witenwasserreuss gilt, zeigte eine entsprechende Analyse an 22 Messstationen entlang der Reuss bis hinunter nach Mellingen. Dieses Diagramm kann auch für die Betrachtung der Geschiebeführung wäh-

rend extremer Hochwasser verwendet werden, dann nämlich, wenn es um Dimensionierungsgrößen geht (ansonst verweise man besser die gemessenen Hochwasserganglinien). Die in Bild 7 dargestellten Kurven könnten natürlich auch mit Hilfe der Niederschläge und einer Berechnung entsprechend dem Beispiel in Bild 3 näherungsweise bestimmt werden. Ein solches Vorgehen soll aber nur dann gewählt werden, wenn keine Abflussmessungen zur Verfügung stehen⁹⁾.

Am Beispiel des zweidimensionalen Kolkes von Wildbachsperrn soll abschliessend gezeigt werden, welche Ergebnisse hinsichtlich Tiefe des Kolkes (Dimensionierungskolk) mit Hilfe von Bild 7 zu erwarten sind. Bis heute bestimmte man einen solchen Kolk mit dem Höchsthochwasser (Endkoltiefe bei $q = \text{konstant}$), wohl wissend, dass in Wirklichkeit kleinere Kolke zu erwarten sind. Man verringerte deshalb die Kolktiefe je nach dem, wie man den einzelnen Fall beurteilte, um 10, 20 oder 30 %. Dieses Vorgehen ist unbefriedigend. Es soll daher gezeigt werden, wie man für die Probleme der Praxis mit Hilfe von Bild 7 die Dimensionierungskolktiefe von Wildbächen bestimmen kann. Dazu werden folgende stark vereinfachende Annahmen getroffen:

- Die Messintervallgröße entspricht der Dimensionierungshochwasserdauer (analog Rechenbeispiel von Bild 3)
- Es erfolgt keine Geschiebezufluss von oberstrom; die Kornverteilung ist der Fullerkurve ähnlich; der Abrieb ist vernachlässigbar klein
- Die Endkolktiefe ist nach spätestens 24 Stunden erreicht.

Unter diesen Voraussetzungen kann die zu erwartende maximale Kolktiefe eines zum Beispiel hundertjährigen Hochwassers abgeschätzt werden¹⁰⁾. Das Ergebnis ist in Bild 8 wiedergegeben. Es zeigt sich, dass wie erwartet die Kolktiefe kleiner ist (im Beispiel etwa 13 %) als bei Zugrundelegung des Endkolkwertes s_o nach 24 Stunden. Weiter ist ersichtlich, dass zum Beispiel zehn zehnjährige Hochwasser einen kleineren Kolk ergeben als ein hundertjähriges, d. h. dass innerhalb einer Zeitspanne von hundert Jahren das hundertjährige Hochwasser die grösste zu erwartende Kolktiefe ergibt.

Diese Ergebnisse wurden unter der Annahme gefunden, dass zu Beginn des Dimensionierungshochwassers kein ins Gewicht fallender Anfangskolk vorhanden ist. Der gefundene maximale Kolk wird um so grösser, je grösser die Anfangskolktiefe durch vorangegangene Hochwasser ist. Setzt man die Kolktiefe des nächstkleineren Hochwassers, nämlich ein fünfzigjähriges, voraus, so wird der Endkolk des hundertjährigen Hochwassers eine ähnliche Grösse erreichen wie s_o . Die in Bild 8 eingetragene Kolktiefenkurve gibt deshalb Minimalwerte an. Es hängt offensichtlich von der geforderten Sicherheit ab, welche Kolktiefe einer Sperrfundation schliesslich zugrundegelegt werden soll. Für den üblichen Wildbachverbau genügt die alleinige Berücksichtigung dieser Minimalwerte.

9) Es ist durchaus möglich, dass ein hundertjähriger Starkregen in Natur kein hundertjähriges Hochwasser liefert.

10) Man berechnet für die geltenden Werte b , h , d_{95} der Wildbachsperrn mit Hilfe der Kolkgleichung (10) [siehe Anhang] die Kolktiefen s_t in Abhängigkeit vom spezifischen Abfluss \bar{q} und der Hochwasserdauer t und findet die Kurvenschar in Bild 8. Hierauf werden aus Bild 7 die den verschiedenen Messintervallen t (Messintervallgröße = Dimensionierungs-Hochwasserdauer) zugeordneten spezifischen Abflüsse der gewünschten Wiederkehrperiode (zum Beispiel \bar{q}^{*100} bzw. \bar{q}_{100}) abgelesen und auf Bild 8 übertragen, wodurch man die stark ausgezogenen Kurven erhält.

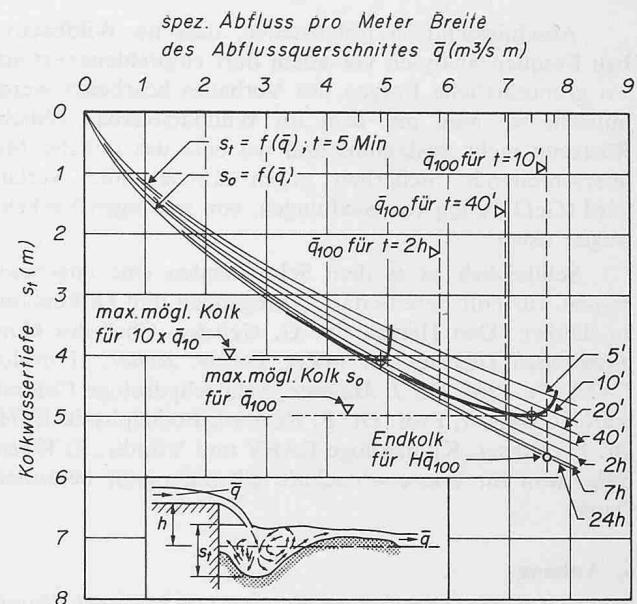


Bild 8. Kolkwassertiefe eines hundertjährigen Hochwassers auf Grund der Frequenzanalyse nach Gumbel mit Abflussdaten von Bild 7, Breite des Abflussquerschnittes $b = 7,0 \text{ m}$, Absturzhöhe $h = 4,0 \text{ m}$, Korndurchmesser $d_{95} = 1,00 \text{ m}$; $q_{10} = \text{zehnjähriges Hochwasser}$, $q_{100} = \text{hundertjähriges Hochwasser}$, $Hq_{100} = \text{hundertjährige Hochwasserspitze}$, $s_t = \text{Kolkwassertiefe zur Zeit } t$

Die nach der dargestellten Methode gefundenen Kolktiefen werden um so kleiner, je steiler die Kurven in Bild 7 verlaufen. Vergletscherte Kleineinzugsgebiete mit ihren meist langdauernden Hochwassern ergeben deshalb meist wesentlich grössere Kolktiefen als die kurzen, intensiven Starkregenhochwasser unvergletscheter Gebiete¹¹⁾.

5. Schlussbemerkungen

Mit Hilfe von Starkregen, Schneeschmelze und Wasserabflüssen wurde die Verwendbarkeit und Handlichkeit der Frequenzanalyse zur Lösung hydrologischer Probleme gezeigt und an Beispielen deren Aussagewert dargelegt. Die Verwendungsmöglichkeiten solcher Analysen sind vielfältig. Im Fluss- und Wildbachverbau reichen sie von Problemen der maximalen oder auch minimalen Wasserführung über solche des Sedimenttransports bis zu denen der Wassertemperaturvorhersage; es sind also Probleme, die schliesslich auch den Gewässerschutz interessieren. Auch können auf diese Weise saisongebundene Fragen studiert werden. Neben den statistischen Randbedingungen, die erfüllt sein müssen, sind vor allem zwei Belange wesentlich, nämlich 1. müssen die Messreihen genügend lang und homogen sein, und 2. sind die physikalischen Gesetze einzuhalten, d. h. unter anderem, dass eine Extrapolation in den Bereich beliebig grosser Wiederkehrperioden nicht zulässig ist. Diese Gesetze legen nicht überschreitbare Grenzwerte fest (max. möglicher Niederschlag, max. mögliches Hochwasser usw.). Es wird noch erheblicher Anstrengungen bedürfen, bis solche für die Schweiz gültigen Grenzwerte in Meteorologie und Hydrologie gefunden sein werden.

11) Möglicherweise können mit dem Unit-Hydrograph-Verfahren im Prinzip noch aussagekräftigere Ergebnisse erzielt werden. Zu berücksichtigen ist aber, dass dieses Verfahren vorzugsweise für grosse Einzugsgebiete (Flüsse) verwendet wird und für kleine nicht in Gebrauch ist, weil es schwierig ist, eine wirklich repräsentative Einheitsganglinie aufzufinden. Da die nach verschiedenen Methoden gefundenen Ergebnisse zum Teil methodenbedingte Eigenheiten aufweisen, empfiehlt es sich, sie speziell zu bezeichnen, zum Beispiel Gumbel-Hochwasser, Gumbel-Kolk, Unit-Hydrograph-Kolk usw.

Abschliessend ist festzustellen, dass im Wildbachverbau Frequenzanalysen vor allem dort empfehlenswert sind, wo grundsätzliche Fragen des Verbaues bearbeitet werden müssen, wo man mit dem im Wildbachverbau üblichen Rüstzeug nicht auskommt und wo eine das übliche Mass überschreitende Sicherheit gegen Katastrophen verlangt wird (Gefährdung von Siedlungen, von wichtigen Verkehrs wegen usw.).

Schliesslich ist es dem Schreibenden eine angenehme Pflicht, für Hilfsbereitschaft, Anregungen und Diskussionen zu danken. Den Herren Dr. G. Gensler, Chef des klimatologischen Dienstes der MZA, Dr. H. Keller, Hydrologe EAFV¹²⁾, Prof. Dr. J. Meiman, Schneehydrologe Colorado State University, Prof. Dr. F. Richard, Bodenphysik ETHZ, Dr. H. Turner, Klimatologe EAFV und Vizedir. E. Walser, Eidg. Amt für Wasserwirtschaft, gilt mein ganz besonderer Dank.

6. Anhang

Praktisches Vorgehen bei der Frequenzanalyse nach Gumbel

Man sucht den Grösstwert eines jeden Jahres heraus. Diese Werte ordnet man der Grösse nach und gibt ihnen eine Rangordnung (d. h. den Rang m innerhalb der total n Grösstwerte). Die dazugehörige Wiederkehrperiode ist $T_r = (n + 1)/m$. Diese Grösstwerte werden mit der Wiederkehrperiode als Abszisse auf logarithmischem Papier eingetragen (Bild 1) und die Punktfolge durch eine Gerade approximiert.

Kalendariische Einteilung

Die kalendariische Einteilung hat zur Folge, dass unter Umständen Starkregenereignisse entzwei geschnitten werden und deshalb als niederrangig erscheinen. Sorgfältige Untersuchungen des US Weather Bureau [2] ergaben für einstündige Messintervalle eine Verminderung gegenüber den effektiven Werten um 10 bis 15 %. Wie gross diese Abweichungen in der Schweiz sind, wurde bis heute nicht untersucht.

Gerinneloser Abfluss

Im Rechenbeispiel wurde die empirische Beziehung von C. F. Izzard [6] für die Bestimmung der Laufzeit verwendet. Im metrischen Massssystem lautet die Gleichung:

$$t_0 = [527 \cdot c \cdot L_0^{1/3}] / [J_0^{1/3} \cdot (C \cdot i_T)^{2/3}]$$

t_0 Laufzeit in Minuten

c Wasserrückhaltkoeffizient (im Beispiel mit 0,10 angenommen)

C Abflusskoeffizient (mit 0,60 angenommen)

L_0 Weglänge des gerinnelosen Abflusses (geländeparallel) in m

J_0 mittlere Hangneigung (Absolutwert)

i_T mittlere Regenintensität der Wiederkehrperiode T_r in mm/Std

In Wirklichkeit ist t_0 die Zeit (vom Regenbeginn an gerechnet), die erforderlich ist, bis der Abfluss aus der Parzelle 97 % des möglichen erreicht hat. Dies unter der Voraussetzung, dass die Regenintensität i konstant ist. t_0 ist daher ein gutes Zeitmass für das volle Ansprechen des Parzellenabflusses auf den Starkregen und wird deshalb meist als Laufzeit des gerinnelosen Abflusses angenommen.

¹²⁾ EAFV: Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, ETH.

Gerinneabfluss

Für die Berechnung der Gerinnelaufzeit t_G wurde gleichförmiger Abfluss vorausgesetzt und t_G mit Hilfe der Gleichung von Strickler und der Kontinuitätsgleichung bestimmt. Die totale Laufzeit ist dann $t_{tot} = t_0 + t_G$

Wasseranfall aus Regen

Der Abfluss eines Kleineinzugsgebietes (Parzelle) beträgt:

$$Q = a \cdot C \cdot E \cdot i_T$$

a Umrechnungskoeffizient (0,278)

C Abflusskoeffizient (s. Gl. Izzard)

E Einzugsgebiet in km²

i_T Regenintensität der Wiederkehrperiode T_r in mm/Std

Q Abfluss in m³/s

Kolkgleichung

Der zeitliche Verlauf der Kolkbildung wurde nach der Gleichung von D. Kotoulas [8] bestimmt, welche einen ungefähren Wert für die Kolktiefe liefert. Dieser ist

$$s_t = s_0 (1 - e^{-\alpha \sqrt{t}})$$

mit $s_0 = 0,88 \cdot h^{0,343} \cdot \bar{q}^{0,686} / d_{95}^{0,372}$

s_t Kolktiefe zur Zeit t in m vom Wasserspiegel aus gemessen (oft auch Kolkwassertiefe genannt)

s_0 Endkolktiefe

h Absturzhöhe in m

\bar{q} konstanter Abfluss pro Meter Breite des Abflussquerschnittes in m³/s

d_{95} Korndurchmesser, der von 95 % sämtlicher Korngrössen unterschritten wird, in m

$\alpha = 0,55$ in s^{-1/2}

Adresse des Verfassers: Jürg Zeller, dipl. Ing., Beratungsstelle für Wildbach- und Hangverbau, Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, 8903 Birmensdorf ZH.

Literaturverzeichnis

- [1] E. J. Gumbel: On the plotting of flood discharges. "Trans. Am. Geophys. Union", 1943, Vol. 24, Part 2, pp. 699—719.
E. J. Gumbel: Statistical theory of extreme values and some practical applications. U. S. National Bureau of Standards, Appl. Math. Ser. 33 February 1954.
E. J. Gumbel: Statistics of extremes. Columbia University Press, NY. 1958.
- [2] R. K. Linsley, M. A. Kohler, J. L. H. Paulhus: Hydrology for engineers. New York 1958. McGraw-Hill Book Co., pp. 246—266.
- [3] Schweiz. Meteorologische Zentralanstalt (SMZ): Ergebnisse der täglichen Niederschlagsmessungen (1901 bis 1969) resp. Annalen der SMZ.
- [4] A. Hörl, H. R. Rhein: Die Intensitäten der Starkregen in der Schweiz. «Schweiz. Zeitschrift für Hydrologie», Vol. XXIV (1962), pp. 291—352.
- [5] Bureau of Reclamation: Design of small dams. U. S. Dept. of the Interior 1960, pp. 42—61 (U. S. Government Printing Office, Washington).
R. K. Linsley, M. A. Kohler, J. L. H. Paulhus: Hydrology for engineers. London 1958. McGraw-Hill Book Co., pp. 303—306.
Am. Soc. of Civil Eng.: Design and construction of sanitary and storm sewers. WPCF Manual of Practice 1969, No. 9.
- [6] C. F. Izzard: Hydraulics of runoff from developed surfaces. "Proc. Highway Research Board", Vol. 26 (1946), pp. 129—150.
- [7] Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung: Winterberichte, Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, Bern.
- [8] D. Kotoulas: Das Kolkproblem unter besonderer Berücksichtigung der Faktoren Zeit und Geschiebemischung im Rahmen der Wildbachverbauung. «Mitteilungen der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen», Vol. 43 (1967), Heft 1, S. 67.
- [9] Int. Assoc. of Scientific Hydrology und andere: Floods and their computation. IASH-Unesco-WMO, Vol. I and II (1969), IASH-publication No. 84/85.