

Abschätzung von Spitzenabflüssen in kleinen natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz

Autor(en): **Kölla, Elisabeth**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **105 (1987)**

Heft 33-34

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76678>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

andere stehen kann, soll abschliessend gezeigt werden, wie systematisch analysierte Schadenfälle zu bedeutenden Innovationen geführt haben:

Dieser Tage wird in der ganzen Welt der 50. Jahrestag der Eröffnung der «Golden-Gate»-Hängebrücke von San Francisco gefeiert. Wer denkt dabei heute noch daran, dass der glanzvollen Entwicklung zu immer noch grösseren Spannweiten, wie es die Golden-Gate-Brücke eindrücklich vorführt, der Ein-

sturz der Tacoma-Narrows-Brücke vorausging, der zu einer systematischen Analyse der möglichen Instabilitäts-Zustände von Hängebrücken zwang?

Analog sind heute die Regelmechanismen der Umwelt ins Schlingern geraten. Es wäre geboten, vor dem Eintritt des Kollapses die Ursachen zu erforschen und daraus die nötigen Kurskorrekturen abzuleiten, um Technik und Natur – wieder? – in harmonischen Einklang zu bringen.

Adresse des Verfassers: R. Leisi, dipl. Bauing. ETH/SIA, c/o Leisi + Messerli, Ländtestrasse 45, 2503 Biel.

Die Arbeitsgruppe 4 des SIA – Bern:

R. Geiger, Architekt, Bolligen
A. Jerin, Bauingenieur, Köniz
R. Leisi, Bauingenieur, Ipsach
P. Lüthi, Bauingenieur, Bern
E. Ramseier, Masch. Ing., Herzogenbuchsee
Dr. N. Sieber, Geologe, Muri
P. Suter, Planer, Mühlethurnen

Abschätzung von Spitzenabflüssen in kleinen natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz

Von Elisabeth Kölla, Zürich

Gebräuchliche Hochwasserschätzmethoden werden in der Schweiz praktisch unverändert so verwendet, wie sie vor Jahrzehnten vorgeschlagen wurden. Neuere hydrologische Erkenntnisse und umfangreichere Datenserien stellen die Qualität dieser herkömmlichen Verfahren jedoch in Frage, und die Anpassung einer geeigneten Schätzformel drängt sich auf. Im folgenden wird eine physikalisch plausible Methode zur Abschätzung starkregenbedingter Hochwasserabflüsse aufgrund einfacher Gebietsparameter beschrieben. Die vorgeschlagene Methode basiert auf Abflussmessungen in schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen bis etwa 100 km².

Einführung

Die Ermittlung von Spitzenabflüssen in Einzugsgebieten ohne Direktmessung des Abflusses verlangt, dass mit anderen Kennwerten des interessierenden Gebiets oder der Region gearbeitet wird. Es stehen heute Schätzformeln zur Verfügung, die Abhängigkeiten zwischen Spitzenabfluss und Gebietsparametern auf rein empirische Art beschreiben. Andererseits kennt man auch Verfahren, welche auf physikalischen Modellvorstellungen über die Zusammenhänge zwischen Abflussbildung und Gebietseigenschaften beruhen.

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Frage, ob die heute gebräuchlichen Formeln dem Vergleich mit neueren Auswertungen von Messreihen aus kleineren natürlichen schweizerischen Einzugsgebieten standhalten und welcher Ursache allfällige Mängel sind. Anschliessend wird eine neue Möglichkeit vorgestellt, das Problem der Hochwasserschätzung anzugehen.

Als Grundlage für diese Untersuchungen wurden die Abflussmessserien aus

etwa 170 Gebieten extremwertstatistisch ausgewertet und für jedes Gebiet der 2,33jährige, der 20jährige und, wenn die Messperiode von ausreichender Länge war, der 100jährige Spitzenabfluss bestimmt (2,33 Jahre ist die Überschreitenswahrscheinlichkeit des Mittels aller jährlichen Höchstwerte, sofern diese einer Gumbel-Verteilung folgen). Eine Übersicht über die geographische Verteilung der ermittelten 20jährigen spezifischen Abflüsse gibt Bild 1.

Für die Weiterbearbeitung des Problems ergaben sich die folgenden

Randbedingungen:

- Als *Informationsträger* für Gebietskennwerte kommen nur Werke in Betracht, welche für die Schweiz lückenlos vorhanden sind. Dies sind in erster Linie Kartenwerte (topographische Landeskarten, thematische Karten) [3].
- Mehrere *Fehlerquellen* führen bereits bei der Aufarbeitung der Grunddaten auf Verfälschungen der effektiv aufgetretenen Spitzenabflusswerte. Die Güte einer Schätzmethode wird von der Genauigkeit dieses Grund-

bzw. Eichdatenmaterials geprägt. Das Modell kann also höchstens diesen Standard erreichen.

Als Illustration zu letzterem Punkt sei noch angeführt, warum bei *Hochwasserdaten* in *kleinen* Einzugsgebieten mit grossen Fehlerbändern gerechnet werden muss:

- Hochwasser werden nicht *direkt* erhoben, sondern von Pegelstandsmessungen abgeleitet. Für die Pegelstand-Abfluss-Beziehung stehen vor allem in kleinen Einzugsgebieten nur Eichwerte im Mittelwasserbereich zur Verfügung; die daraus abgeleitete Gesetzmässigkeit zwischen Wasserstand und Abfluss muss für hohe Werte extrapoliert werden.
- Pegelstände können in Hochwassersituationen durch *Geschiebe* verfälscht sein.
- Als *Eichgrundlage* dienen die Resultate aus einer extremwertstatistischen *Auswertung* der «Rohdaten» (Abflusswerte mit bestimmtem Wiederkehrintervall). Damit hängt jene stark von der *Wahl der Verteilungsfunktion* der Stichprobe ab. Besonders bei *kürzeren* Messperioden (wie sie zurzeit aus kleinen Einzugsgebieten häufig vorliegen) ist diese Wahl kaum eindeutig und deshalb vom Entscheid des Anwenders abhängig. In solchen Fällen besteht ausserdem Unsicherheit bezüglich der Art und Weise, wie auf höhere Jährlichkeiten extrapoliert werden soll.

Konzepte

Erste Schätzmethoden für Spitzenabflüsse an Fliessgewässern der Schweiz wurden bereits Ende des letzten Jahrhunderts angegeben, nachdem 1863 mit der Aufzeichnung von Pegelständen an

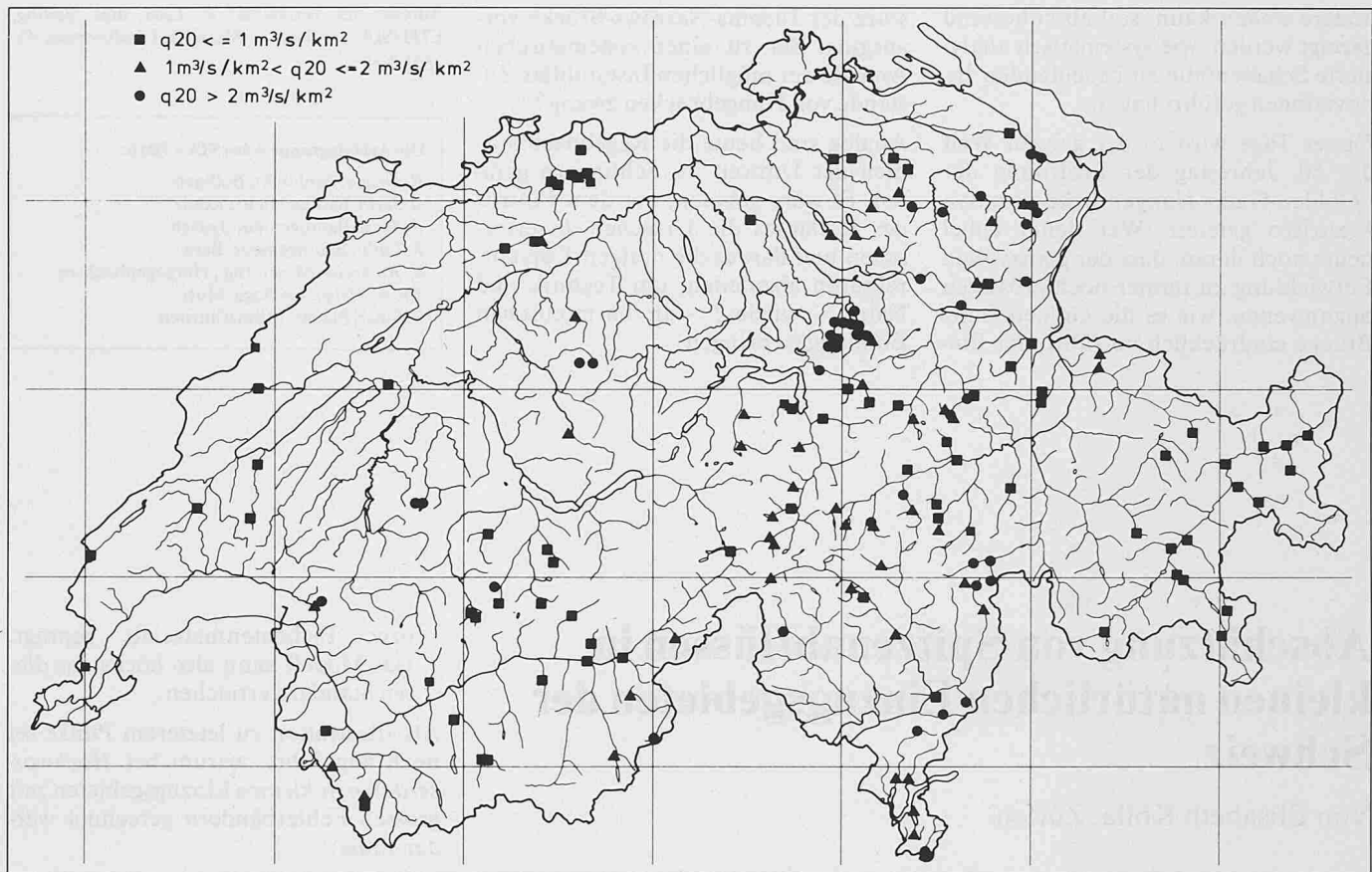


Bild 1. 20jährige spezifische Abflüsse (Schweiz)

Gewässern und 1864 mit der Erhebung meteorologischer Daten begonnen worden war. Die erste Schätzvorschlag war wohl derjenige von *Arnold Bürkli-Ziegler* (1880) [1], seinerzeit Stadtgenieur von Zürich. Der Berner Ingenieur *Robert Lauterburg* schlug 1887 [8] ein detailliertes, auf zahlreichen physikalischen Überlegungen beruhendes Verfahren vor. Es folgten die einfacher auf gebauten Formeln von *Hofbauer* (1916) [4], *Kürsteiner* (1917) [7], *Melli* (1924) [9] und *Müller* (1943) [10], um nur die bekanntesten zu nennen. Diese Autoren verwendeten für die Herleitung ihrer Formeln Datenmaterial, das sich aus den höchsten je beobachteten Spitzenabflüssen in den untersuchten Gebieten zusammensetzte.

Eine einfache Möglichkeit, einen extremen Abfluss für ein Gebiet ohne Messungen anzugeben, bietet die Gleichung einer Kurve, die das Einzelwertfeld von den höchsten, in anderen Gebieten gemessenen Hochwasserwerten nach oben begrenzt («Umhüllende»). Den mit der gefundenen Beziehung berechneten Grössen wird dann der etwas unglückliche Ausdruck «Höchsthochwasser» gegeben, obwohl selbstverständlich den ermittelten Spitzenwerten keine Überschreitenswahrscheinlichkeit (und vor allem nicht eine von 0) zugeordnet werden kann. Aussagen darüber sind nur möglich, wenn das

Grunddatenmaterial eine einheitliche Jährlichkeit hat, also bezüglich seiner Auftretenswahrscheinlichkeit mit einer geeigneten Methode homogenisiert wurde.

Für die neu ausgewertete Datenstichprobe wurden Jährlichkeiten berücksichtigt und die entsprechenden Hochwasserwerte als Funktion der Fläche in einem Diagramm aufgetragen (Bild 2). Dabei beschreiben die Gleichungen

- (1) $HQ_{2,33\max} = 3,0 \cdot F^{0,85}$,
- (2) $HQ_{20\max} = 6,0 \cdot F^{0,85}$,
- (3) $HQ_{100\max} = 12,0 \cdot F^{0,85}$

umhüllende Geraden der Stichproben in einem doppelt logarithmischen Koordinatensystem (Ansatz *Melli*). Damit wird mit einer einfachen, rein empirischen Flächenformel das maximal zu erwartende Hochwasser der betreffenden Jährlichkeit abgeschätzt.

Unbefriedigend ist natürlich der grosse Streubereich. Die Graphik zeigt, dass mit den vorgeschlagenen Gleichungen der «wahre» Wert um das Zehnfache überschätzt werden kann. Die Fläche allein reicht offenbar nicht aus, um die Grösse des Hochwassers abzuschätzen.

Es liegt nahe, die Grunddaten zu *klasieren* und für jede Gruppierung die entsprechende Umhüllende anzugeben. Aufgrund von physikalischen Überlegungen können diejenigen Ge-

bietskennwerte berücksichtigt werden, welche eine *dämpfende* oder *verschärfende* Wirkung auf das Hochwasseregehen haben könnten, wie beispielsweise die Neigung der Hänge, die Vegetation und die Regenverhältnisse.

Dieser Formeltyp wird heute am häufigsten gebraucht. Die Gebietsparameter treten dabei einzeln auf oder gehen in einen Spitzenabflusskoeffizienten ein, der die allgemeinen Verhältnisse charakterisiert (\rightarrow Morphologischer Kasten).

Bild 3 zeigt für einige gängige Formeln den abgeschätzten Höchsthochwasserabfluss in Funktion der Einzugsgebietsfläche. Die beiden Kurven pro Formeltyp geben an, in welchem Wertebereich der für eine bestimmte Fläche ermittelte Spitzenabfluss je nach gewählter Gebietsparameterkombination liegen kann. Der Streubereich des vorliegenden Datenmaterials ist offensichtlich durch die Schätzvorschläge der diversen Autoren gut abgedeckt. Versucht man jedoch, einzelne Werte mit einer Formel nachzuziehen, so stellt man fest, dass die Verfeinerung durch die Beiwerte oft in eine falsche Richtung läuft: Alpen kristallinen Gebieten schreibt man wegen ihrer Kargheit und Steilheit i. a. ein hohes, hügeligen, z. B. voralpinen, Waldgebieten ein tiefes Hochwasser zu, obwohl es gar nicht selten gerade umgekehrt ist. Offenbar ver-

mögen die Beiwerte noch nicht vollumfänglich das zu beschreiben, was einen hohen oder tiefen Spitzenabfluss ausmacht.

(Halb-)empirische Formeln sind stark vom Datenmaterial geprägt, aus dem sie hergeleitet wurden. Resultate aus Formeln, die auf einem plausiblen physikalischen Hintergrund aufgebaut sind, lassen sich besser interpretieren. Die «Rational Formula» (in der Schweiz eher unter dem Namen «Laufzeitverfahren» bekannt), detailliert beschrieben mit allen Voraussetzungen und Annahmen z. B. von Chow (1964) [2], berücksichtigt physikalische Zusammenhänge. Mittlerweile existieren nebst der ursprünglichen Form daraus abgeleitete Methoden und zahlreiche Weiterentwicklungen. Als eine solche für schweizerische Kleinzugsgebiete kann das Verfahren von Taubmann (1986) [11] genannt werden, das auf der Basis der Abflussdaten der Ergolz und deren Teileinzugsgebiete entwickelt wurde.

Der «Rational Formula» liegt im Gegensatz zu den erwähnten Formeln ein klares Konzept über den *Fliessweg des Wassers* zugrunde: Der Hochwasserabfluss wird durch jenen Anteil des Starkregens verursacht, der die Infiltrationskapazität der Bodenoberfläche übersteigt (Horton, 1933)[5]. Dieser Regenanteil wird durch einen Abflusskoeffizienten charakterisiert, d.h., er ist direkt proportional der Regenintensität. Auf der Grundlage von Daten stark besiedelter Einzugsgebiete aufgebaut und dementsprechend ursprünglich vorwiegend in der Kanalisationstechnik verwendet, wurde das Verfahren später auch in natürlichen Gebieten unter Beibehaltung desselben hydrologischen Prinzips angewendet. Das grössere Retentionsvermögen natürlicher Böden wurde nur mit einem entsprechend kleineren Abflusskoeffizienten beschrieben.

Dieser Umstand führte in letzter Zeit zu einiger Kritik am Verfahren. Es wird daran gezweifelt, ob diese einfache Beschreibung des Verhaltens eines natürlichen Einzugsgebiets zulässig ist. Insbesondere kann der *klassische Hortonische Oberflächenabfluss* in gut strukturierten Böden selbst während intensiven Regen selten beobachtet werden.

Sieht man von den physikalisch nicht begründeten, empirischen Formeln ab, so ist die «Rational Formula» mit allen ihr verwandten Methoden in kleinen Einzugsgebieten dennoch das am häufigsten angewendete Verfahren zur Abschätzung von Spitzenabflüssen.

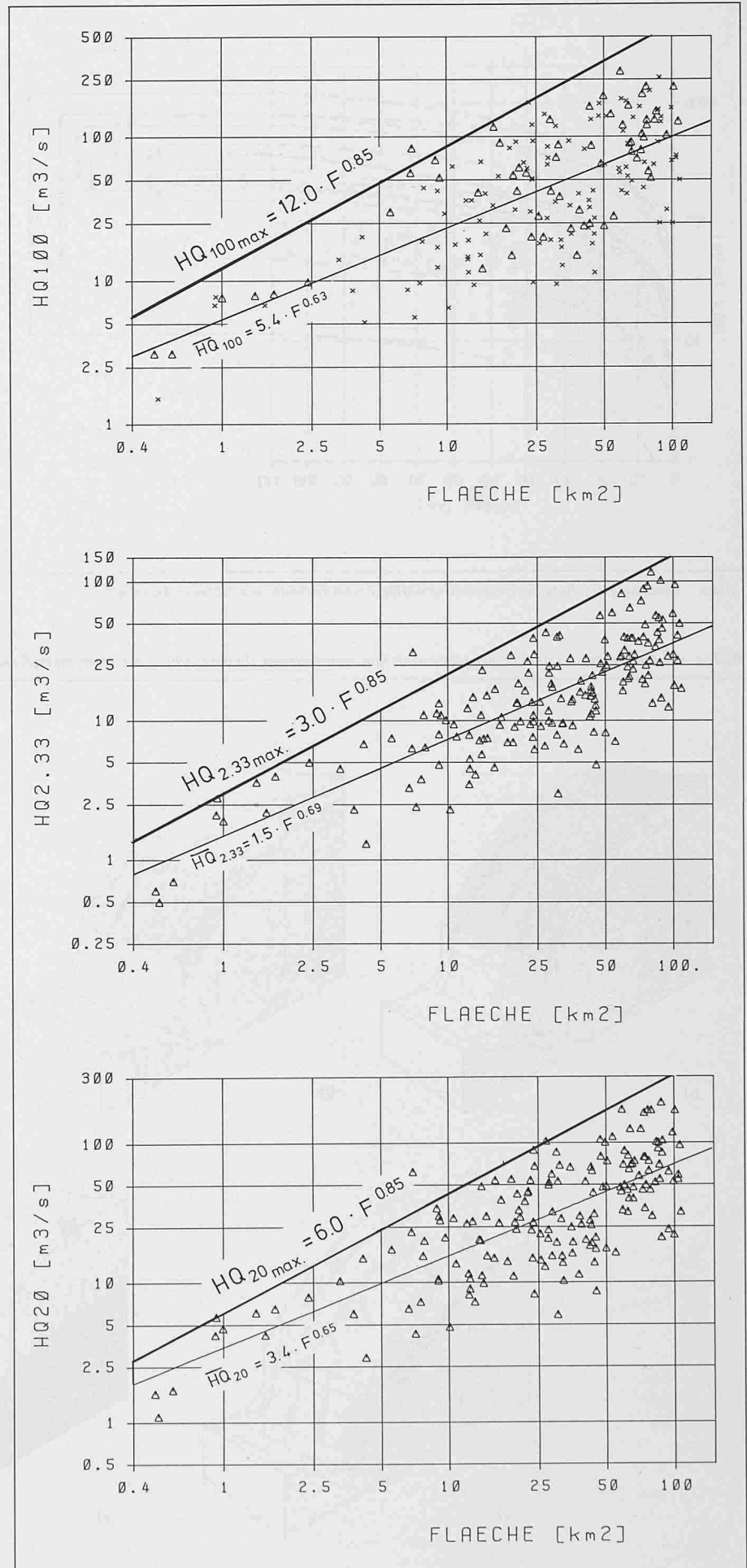


Bild 2a-c. 2,33-, 20- und 100jährige Hochwasserabflüsse als Funktion der Einzugsgebietsfläche. Die Umhüllende gibt den maximal zu erwartenden Abfluss der betreffenden Jährlichkeit an

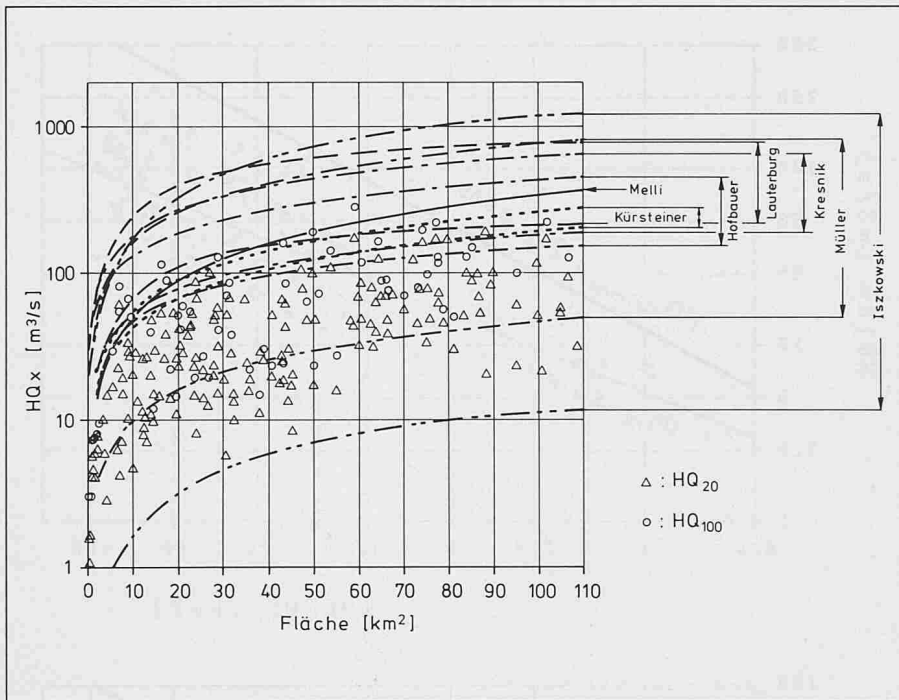


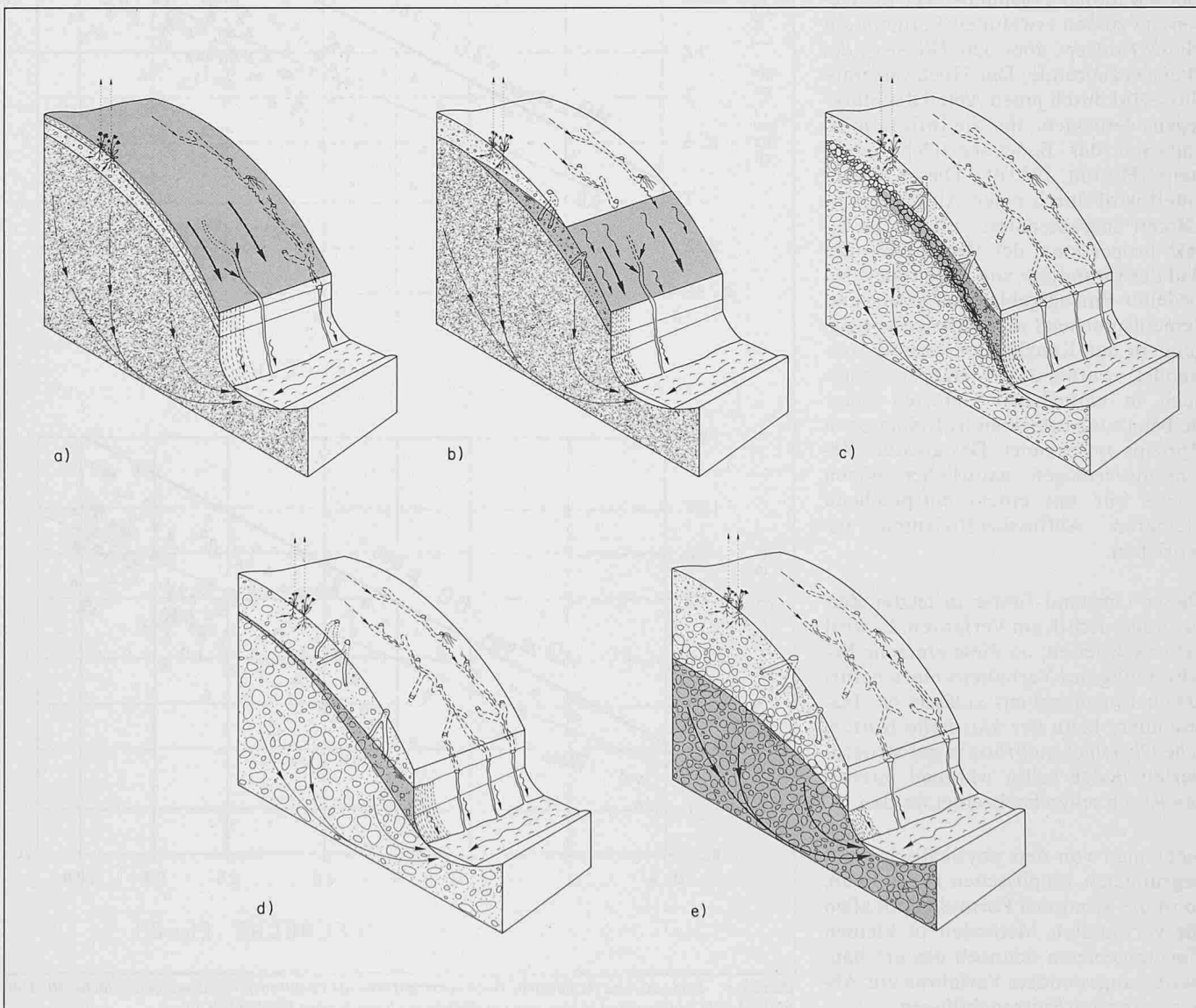
Bild 3. Schätzungsergebnisse für Höchstwasserabflüsse nach Formeln verschiedener Autoren

Welche Möglichkeiten bieten sich für Neu- oder Weiterentwicklungen?

Das Problem der Hochwasserabschätzung wieder aufzugreifen, hat hauptsächlich vier Gründe:

- Die Abschätzungen mit Hilfe der herkömmlichen Methoden ergeben oft unbefriedigende Ergebnisse, wie auch der Vergleich mit neueren Messwerten gezeigt hat. Häufig fehlen objektive, klar definierte Kriterien zur Wahl der notwendigen Eingangsgrößen.
- Neue und erweiterte Messreihen bieten zusätzliches Eichmaterial für die Weiter- oder Neuentwicklung einer Formel. Es liegen mittlerweile Starkniederschlagsauswertungen für einen grossen Teil der Schweiz vor (Zeller et al., 1976 ff.[12]), ebenso kartographische Angaben über Gebietscharakteristika.

Bild 4a-e. Ausschnitte aus einem Einzugsgebiet mit fünf verschiedenen, für die Hochwasserbildung massgebenden Abflussvorgängen während Starkniederschlägen



- Das hydrologische Konzept der gängigen Formeln ist unvollständig oder weitgehend überholt.
- Die Randbedingungen und Anwendungsbereiche der üblichen Formeln sind unklar oder gar nicht definiert.

Der Weg zur Erneuerung einer Formel sollte über die Analyse von Abflussvorgängen während Starkniederschlägen zu einer zweckmässigen, einfachen Modellierung führen. Kann letztlich das Gebietsverhalten einigermaßen verstanden und nachvollzogen werden, so ist die Übertragung in Gebiete, aus denen keine Messungen vorliegen, gewährleistet. Dies ist ein wesentlicher Vorteil der angestrebten, physikalisch plausiblen Methode gegenüber einer empirischen Beziehung.

Abflussvorgänge

Zuerst stellt sich also die Frage, ob sich mit dem Begriff «Hochwasserabflussbildung» nur der Typ des *Hortonschen* Oberflächenabflusses verbinden lasse.

Mit dieser Problematik befasst sich seit etwa 20 Jahren ein Forschungszweig der Hydrologie, der unter dem Namen «Hillslope Hydrology» bekannt wurde. Es konnte weitgehend geklärt werden, welche Parameter den Abflussvorgang steuern. Leider fehlt jedoch bis heute die Querverbindung zu Hochwasser-schätzmethode, da zwar die Erhebung der notwendigen Kenngrößen auf der Teilfläche noch möglich, im ganzen Einzugsgebiet jedoch nicht mehr mit vernünftigem Aufwand zu bewerkstelligen ist.

Im Vordergrund stand nun im Rahmen der vorliegenden Untersuchung die Frage,

- ob die in ausländischen Experimenten gefundenen Zusammenhänge auch auf schweizerische Verhältnisse übertragen und hier verifiziert werden könnten und
- ob man *einfache* Relationen zwischen Abflussvorgang und Gebietskennwerten finden könne, die sich in eine Schätzformel einbauen liessen.

Die theoretischen Untersuchungen (Zuidema, 1985[13]) und die Beregnungsversuche im Feld führten zu folgenden Ergebnissen: Je nach Bodenbeschaffenheit und Geometrie der Hänge lassen sich *fünf hochwasserrelevante* Abflussvorgänge beschreiben (Bild 4): Der klassische *Hortonsche Oberflächenabfluss* (A, Bild 4a) kommt auf Böden mit wenig durchlässiger Oberfläche vor. Der *gesättigte Oberflächenabfluss* (B, Bild 4b), entsteht dann, wenn das Bodenprofil bis an die Oberfläche gesättigt ist und deshalb kein Nieder-

schlag *mehr* infiltrieren kann. Dieser Typ ist auf *flachgründige* Böden mit geringer Transportkapazität der Bodenmatrix beschränkt, weil nur dann die Speicherkapazität des Profils während eines Regenereignisses überhaupt erschöpft ist. In *tiefgründigen* Böden erfolgt wegen ihrer grossen Speichervermögen die Entwässerung nur lateral durch eine *hochdurchlässige* Schicht (C, Bild 4c), oder – falls nicht vorhanden – durch die bedeutend weniger effizient ableitende *Bodenmatrix* (D, Bild 4d). Als Spezialfall davon kann der *Grundwasserabfluss* (E, Bild 4e) genannt werden.

Für die Aktivierung dieser Mechanismen müssen vorgängig *Sättigungsdefizite* aufgefüllt werden (in Bild 4 gestert). Damit der Fliessvorgang überhaupt einsetzen kann, muss das Niederschlagswasser die betreffenden Wasserwege benetzt oder in Grundwasservorkommen einen Grundwasserhügel verursacht haben. Sättigungszonen können während des Regenereignisses *wachsen* und *schrumpfen* oder wegen der speziellen Hangform auch zwischen den Ereignissen praktisch unverändert vorhanden sein (Bild 5), wenn z.B. der flache Hangteil dauernd vom Sickerwasser des hangaufwärts liegenden, steilen Bereichs gespeist wird, selber aber schlecht drainiert.

Die erwähnten Abflussvorgänge können nur dann zur Hochwasser*spitze* beitragen, wenn sie auf Hängen auftreten, die an ein Gerinne anschliessen. Da Spitzenabflüsse des hier betrachteten Wiederkehrintervalls von 20 Jahren i.a. auf Regenereignisse von höchstens einigen Stunden Dauer zurückzuführen sind, ist auch die Länge des vom Regenwasser in dieser Zeit zurückgelegten Fliessweges im oder auf dem Boden und damit die beitragende Hanglänge beschränkt.

Modellierung

Wie können nun diese Erkenntnisse in einem Schätzverfahren für Spitzenabflüsse Eingang finden? Wird in Anlehnung an das Prinzip der «Rational Formula» nach einem geeigneten Modell gesucht, so müssen grundlegende Annahmen aufgrund der beschriebenen Eigenarten der Abflussbildung revidiert werden, nämlich:

- Gerinneferne Teilflächen tragen nicht zur Abfluss*spitze* bei. Anstelle der Gesamtfläche des Einzugsgebiets geht deshalb die *effektiv beitragende Fläche* in die Formel ein. Diese Fläche wird beidseitig jedes Gerinnes durch die erste oberirdische

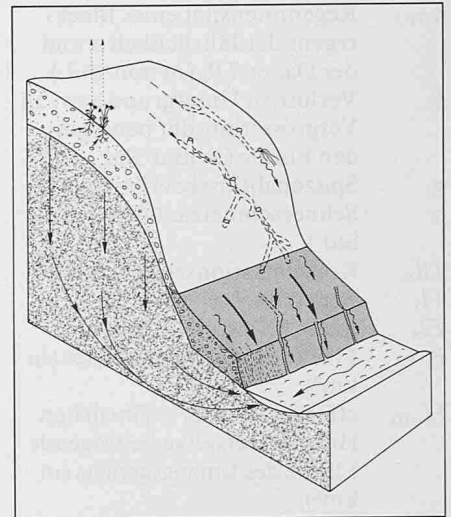


Bild 5. Bodenblock mit spezieller Hanggeometrie; die Topographie begünstigt die Entstehung von gesättigten Flächen am Hangfuss

Wasserscheide oder eine maximal beitragende Hanglänge von etwa 100 m begrenzt (Kölla, 1986; vgl. Abb. 24, S. 100/101, [6]).

- Die Dauer des für das betrachtete Hochwasserereignis massgebenden Regens ist weitgehend davon abhängig, welches *Benetzungsvolumen* für die Bereitstellung dieser gerinnenahe Flächen gefallen sein muss.
- Ein multiplikativer Ansatz (Abflusskoeffizient) für die Bestimmung des Nettoregens (Effektivregen) präjudiziert einen zunehmenden Verlustanteil bei steigender Regenintensität. Dies ist aber nur ein Spezialfall des wesentlich allgemeineren *subtraktiven*, von der Regenintensität unabhängigen Ansatzes.

Beibehalten werden die Annahmen, dass

- Regenintensität und Spitzenabfluss *dieselbe* *Jährlichkeit* hätten,
- die *massgebende* Regendauer TR der Konzentrationszeit des Einzugsgebiets entspreche. Der Abfluss werde also gerade dann maximal, wenn das Ende des Regens und der frühestmögliche Zeitpunkt des grösstmöglichen Abflusses von der beitragenden Fläche zusammenfallen.

Damit geht die bekannte Gleichung der «Rational Formula»

$$(4) \quad HQ_x = r_{x,TR_x} \psi S F$$

über in

$$(5) \quad \frac{HQ_x}{TR_x} = (r_{x,TR_x} - f_x) FL_{effx};$$

oder unter Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen

$$(6) \quad \frac{HQ_x}{(FL_{effx} + FL_b) k_G + Q_{Gle}} = (r_{x,TR_x} - f_x + r_s) \cdot$$

HQ_x x-jährlicher Hochwasserabfluss (in m^3/s),

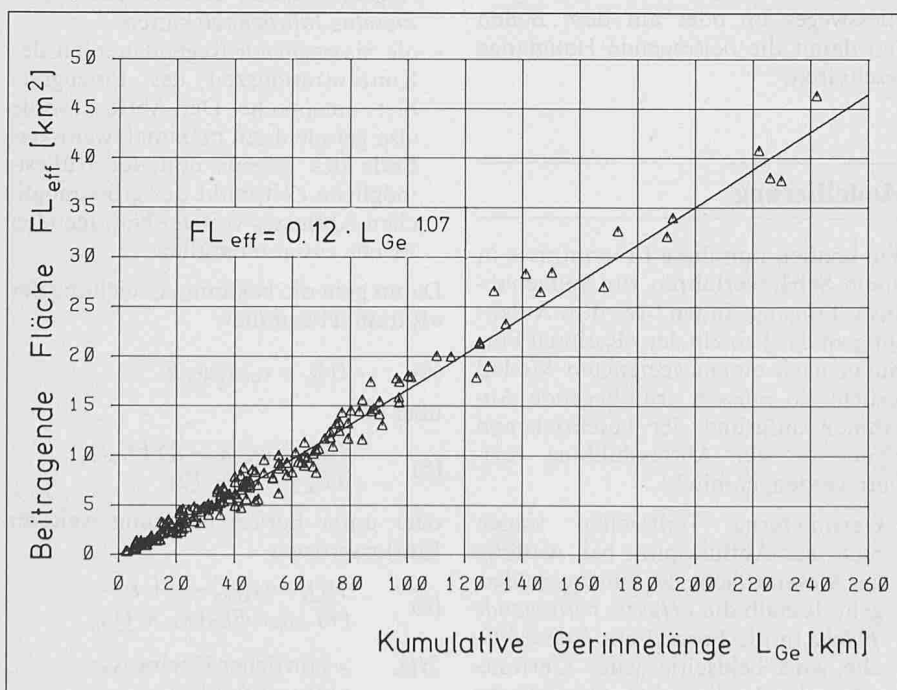
$r_{x,TRx}$	Regenintensität eines Blockregens der Jährlichkeit x und der Dauer TR_x (in mm/Std.),
f_x	Verlust an Untergrund bzw. an Vergrößerung der beitragenden Fläche (in mm/Std.),
ψ_s	Spitzenabflusskoeffizient,
r_s	Schneeschmelzanteil (in mm/Std.),
TR_x	Konzentrationszeit (in Std.),
TI_x	Benetzungszeit (in Std.),
$T2_x$	totale Fließzeit (in Std.),
F	Fläche des Einzugsgebietes (in km^2),
$FL_{\text{eff}x}$	effektiv zu einer x -jährlichen Hochwasserspitze beitragende Fläche des Einzugsgebiets (in km^2),
FL_b	befestigte Fläche (in km^2),
k_G	beschreibt abflusserhöhenden Effekt von (wahrscheinlichen) feuchten Vorbedingungen (Vorregen),
Q_{Gle}	Gletscherabflussanteil (in m^3/s).

Da jedoch in den meisten konkreten Fällen die Grössen FL_b (natürliche Einzugsgebiete), f_x , r_s , k_G und Q_{Gle} gegenüber den Hauptkomponenten Regenintensität und Fläche numerisch nicht ins Gewicht fallen, lässt sich in guter Näherung angeben.

$$(7) \quad HQ_x = r_{x,TRx} \cdot FL_{\text{eff}x}$$

Dieses Modell, aus theoretischen Überlegungen und Beobachtungen in den Experimenten hergeleitet, wurde mit den vorhandenen ausgewerteten Daten geeicht und getestet.

Bild 6. Schätzung der effektiv beitragenden Fläche aus der kumulativen Gerinnelänge (hergeleitet aus den Werten für das Wiederkehrintervall 20 Jahre)



Evaluation der Modellparameter

Für jedes der untersuchten Einzugsgebiete mussten nun die unbekannt Parameter so gefunden werden, dass sie einerseits zu optimalen Schätzergebnissen, andererseits aus physikalischen Gründen mit den gebietsspezifischen Grössen in vernünftiger Relation stehen und eindeutig aus ihnen abgeleitet werden können.

Die Kartierung der effektiv beitragenden Fläche ist zeitraubend. Eine einfache Abschätzungsmöglichkeit für deren Ausdehnung aufgrund von Kennwerten, die mit geringerem Aufwand und objektiver zu erheben sind, wäre wünschenswert. Nach einem Zusammenhang zwischen kumulativer Gerinnelänge und der gefragten Fläche zu suchen, liegt auf der Hand. Für die kartierten und digitalisierten beitragenden Flächen sämtlicher untersuchter Gebiete und deren additiver Länge aller Gerinneabschnitte ergibt sich eine enge Beziehung (Bild 6). Mit der hergeleiteten Schätzfunktion lässt sich im gegebenen Fall auf einfache Weise $FL_{\text{eff}20} = 0,12 \cdot L_{\text{Ge}}^{1,07}$ ermitteln (vgl. Beispiel).

Die totale Fließzeit (Hang \rightarrow Gerinne \rightarrow Kontrollquerschnitt) kann mit der Beziehung

$$(8) \quad T2_x [\text{Std.}] = FL_{\text{eff}x}^{0,2} [\text{km}^2]$$

approximiert werden. Dieses Ergebnis wurde aus vergleichenden Betrachtungen von in Serie am gleichen Fließge-

wässer liegenden Messstationen gewonnen. Im allgemeinen liegen für die betrachtenden kleinen Einzugsgebiete die Werte für $T2$ zwischen 1 und 1,5 Std. Faustwert. Es bleibt also noch die Grösse des erforderlichen Benetzungsvolumens zu bestimmen. Zusammen mit der Beziehung Regenintensität/Regendauer und der bereits bekannten totalen Fließzeit geht daraus die Benetzungszeit TI hervor, welche nach Beginn eines Regenereignisses verstreicht, bis die Sättigungsdefizite der beitragenden Flächen aufgehoben sind (s. Beispiel in Abschnitt 9). Das Benetzungsvolumen und der Verlust wurden mit der Bildung geeigneter Einzugsgebietsgruppen und mittels eines Ausgleichsalgorithmus hergeleitet. Die gefundenen numerischen Werte für das Benetzungsvolumen sowie ihre Beziehung zu den gebietsspezifischen charakteristischen Landschaftselementen können einem *morphologischen Kasten* entnommen werden (Bild 7).

Mit diesen Parametern kann nun für kleine natürliche Einzugsgebiete allein mit Hilfe einer topografischen Karte (*Landeskarte 1:25 000*) der im 2. Abschnitt erwähnten Bodenkarte und den Starkniederschlagsangaben ein 20jähriger Spitzenabfluss abgeschätzt werden.

Übergang auf andere Jährlichkeiten

Die Herleitung der Schätzmethode basiert auf den 20jährigen Spitzenabflüssen; der Anwendungsbereich der Formel ist entsprechend auf diese Wiederkehrperiode beschränkt. In vielen Fällen interessiert jedoch ein häufigeres oder selteneres Ereignis, so dass Angaben über Umrechnungsmöglichkeiten des 20jährigen Wertes auf einen Abfluss höherer oder tieferer Jährlichkeit wünschenswert erscheinen.

Für die Wiederkehrintervalle 2,33 und 100 Jahre wurden die jährlichkeitsabhängigen Bestimmungsgrössen effektiv beitragende Fläche, Benetzungsvolumen und Verlust ermittelt. Der Übergang auf höhere (tieferer) Jährlichkeiten bedingt gemäss Modellvorstellungen, dass die effektiv beitragende Fläche und damit das erforderliche Benetzungsvolumen und die Verluste zu(ab)nehmen. Diese Zu- bzw. Abnahme ist selbstverständlich auch davon abhängig, wie gross der ursprüngliche Wert V_{020} ist. Tabelle 1 enthält die notwendigen Angaben für den konkreten Berechnungsfall.

Restrisiken: Abdeckung der Streuung, weitere Hochwassergefahren

Die Anwendung der Methode in der beschriebenen Form führt zu *wahrscheinlichen* Werten für *starkregenbedingte* Hochwasserabflüsse. Die auftretende Streuung zwischen geschätzten und «gemessenen» Werten aus dem Datenmaterial kann bis etwa Faktor 2 des geschätzten Spitzenabflusses ausmachen. Dieser Wert kann für herkömmliche Methoden bei 5 oder gar darüber liegen (Kölla, 1986 [6]). Diese Streuung ist auf die Qualität der Ausgangsdaten (vgl. Abschnitt 1) und die zwangsläufig vereinfachenden Modellannahmen (Jährlichkeit Regen ↔ Abfluss, Dauer des massgebenden Regens, Ermittlung der beitragenden Fläche usw.) zurückzuführen.

Es gibt überdies andere natürliche Vorgänge, die zu einem extremen Abflussereignis führen könnten und im vorliegenden Modell nicht berücksichtigt werden. Der Praktiker wird sich demzufolge nach der Ermittlung des Schätzergebnisses mit der vorgeschlagenen Formel nicht nur überlegen müssen, wie er den Streubereich der Voraussage abdeckt, sondern auch, wie er die Restrisiken quantifiziert. Als erstes muss demzufolge eine Grösse bestimmt werden, mit welcher der Schätzwert multipliziert werden muss, um auf der «sicheren» Seite zu dimensionieren. Als zweites ist zu klären,

- welche zusätzlichen Hochwassergefahren, die nicht direkt mit dem Regen in Zusammenhang stehen, im gegebenen Fall zu erwarten sind (z.B. mögliche Ausbrüche von Gletscherseen o.ä.),
- ob und welche *wasserstandserhöhenden* Einflüsse, die naturbedingt mit Starkniederschlägen einhergehen, auftreten (Gchiebetrieb, Verklauung des Gerinnes).

Vom Anwender hängt es ab, wie gross er das Sicherheitsrisiko und dementsprechend den jeweiligen Zuschlag wählt.

Anwendung

Der Berechnungsgang wird am Beispiel des Beerenbaches für den Kontrollquerschnitt Amden illustriert. Es wird die vereinfachte Formel - Gl. (7) - verwendet, welche nur die numerisch bedeutendsten Grössen enthält. Für den Gebrauch der detaillierteren Variante - Gl. (6) - sei auf die Beispiele in der ausführlicheren Publikation (Kölla, 1986 [6]) verwiesen.

Landschaftscharakteristik	Alpine kristalline Berglandschaften		Alpine Kalk-Berglandschaften		Flysch-/Bündner-schieferlandschaften		Voralpine Nagelfluhlandschaften		Molasselandschaften des Mittellandes		Jura-Kalklandschaften	
	Standard	Trogfläler mit Talschotter	Standard	Trogfläler mit Talschotter	Standard	Trogfläler mit Talschotter	Standard	Sohlentäler	Standard	Sohlentäler	Standard	Sohlentäler
Bodenkarte	V,W	R,Y (V8,W8)	U	R,Y (U8)	S (T)	R,Y (Q)	M,N,O, P,X,(G)	R,Y (Q)	G,H, K,L	G1,H4, J1,Q	A,B,C, D,E	B2,B5
BASISWERT	E	B	C	B	D	B	C	B	D	B	C	B
Tiefgründigere Böden (starke Bewaldung o.ä.)	F	C	D	C	D	C	C	C	D	C	D	C
Flachgründigere Böden (oberflächennahe Stauschichten o.ä.)	D	B	B	B	B	B	B	B	D	B	C	B
Starkes Relief	E	B	C	B	C	B	B	B	C	B	B	B
Schwaches Relief	E	B	C	B	D	B	D	B	E	B	C	B
FL _{eff} hauptsächlich in der Nähe des Vorfluters	B	A	B	A	B	A	C	B	D	A	C	A

Bild 7. Erforderliches Regenvolumen, das während der Benetzungszeit T₁ gefallen sein muss, um einen x-jährlichen Spitzenabfluss zu erzeugen. Für 20jährige Spitzenabflüsse gilt A: = 20 mm, B: = 25 mm, C: = 30 mm, D: = 35 mm, E: 40 mm, F: = 45 mm

	V ₀₂₀ [mm]	f ₂₀ [mm/h]	V _{02.33} [mm]	f _{2.33} [mm/h]	k _{F2.33}	V ₀₁₀₀ [mm]	f ₁₀₀ [mm/h]	k _{F100}
A	20	[mm]		[mm]	0,9		[mm]	1,1
B	25	f ₂₀ = 0,1 · V ₀₂₀	V _{02.33} = 0,5 · V ₀₂₀	f _{2.33} = 0,1 · V _{02.33}	0,8	V ₀₁₀₀ = 1,3 · V ₀₂₀	f ₁₀₀ = 0,1 · V ₀₁₀₀	1,15
C	30				0,75			1,2
D	35				0,7			1,25
E	40				0,65			1,3
F	45				0,6			1,3

Tabelle 1. Volumen- und Flächenfaktoren für Extrapolationen

Grundsätzlich geht man bei der Abschätzung folgendermassen vor: Man erhebt und schätzt sämtliche Grössen für die 20jährige Wiederkehrperiode. Dieser Weg wird in a) bis e) beschrieben. Falls gewünscht, ermittelt man danach die für die Extrapolation auf andere Jährlichkeiten zusätzliche notwendigen Variablen und steigt dann wieder bei der Bestimmung der Regendauer und -intensität ein (Punkt d).

a) Erhebung der Schätzung aller notwendigen Grundparameter: Die Fläche des Einzugsgebiets beträgt F = 5,6 km², die kumulative Gerinnelänge L_{Ge} = 13 km. Die direkte Ermittlung der beitragenden Fläche aus dem Übersichtsplan 1:10 000 führt zu FL_{eff20} = 1,8 km². Die näherungsweise Ermittlung der effektiv beitragenden Fläche aus der kumulativen Gerinnelänge ergibt (Bild 6)

FL_{eff20} = 0,12 · L_{Ge}^{1,07} = 1,9 km². Die totale Fliesszeit führt dann nach Gl. (8) auf die Gleichung T₂₀ = FL_{eff20}^{0,2} = 1,13 Std.

b) *Landschaftscharakteristik (Bodenklassifikation)*: Aufgrund der Bodeneignungskarte ist dieses Einzugsgebiet der alpinen Kalk-Berglandschaft (Churfirnenkette) zuzuordnen. Es ist zu beachten, dass in diesem Gebiet eine mergelige Stauschicht zu finden ist, die zu sehr flachgründigen Böden führt.

c) *Erforderliches Benetzungsvolumen V₀₂₀*: Der Landschaftscharakteristik entsprechend ist gemäss Bild 7 eine Volumengruppe zu wählen. Anstelle der Basiswertzeile wird, da die Unterspezifikation «flachgründigere Böden» zutrifft, die 3. Zeile gewählt (B: V₀₂₀ = 25 mm).

d) *Regendauer/-intensität*: Als Unterlage dient das Niederschlagsintensitäts-Diagramm der Station Weesen (Zeller et al., 1976–1983: Station 2.38 [12]). Die massgebende Regendauer ist $TR_{20} = TI_{20} + T_{20}$, wobei T_{20} bereits geschätzt wurde. Die Benetzungszeit TI_{20} wird nun iterativ so bestimmt, dass die folgende Gleichung erfüllt ist: $r_{20}(TR_{20}) \cdot TI_{20} = VO_{20}$, das Auffüllen des erforderlichen Benetzungsvolumens also nach der Benetzungszeit TI_{20} gewährleistet ist. Der erste Schätzwert für TR_{20} wird etwas grösser als T_{20} gewählt, im vorliegenden Fall z.B. 1,2 Std. Einige wenige Iterationen führen dann zum Ziel: Die massgebende Regendauer beträgt 1,8 Std., die zugehörige Regenintensität $r_{20}(TR_{20}) = 37 \text{ mm/Std.}$

e) *Berechnung von HQ_{20} nach Gl. (7)*: $HQ_{20} = r_{20} \cdot FL_{\text{eff}20} = 37 \cdot 1,87 \cdot 0,278 = 19,2 \text{ m}^3/\text{s}$ (1 mm/h entspricht $0,278 \text{ m}^3/\text{s}$ pro km^2 Einzugsgebietsfläche).

f) *Umrechnung auf $HQ_{2,33}$ und HQ_{100}* : Die Faktoren k_{Fix} und k_{Vox} , welche die Zu- bzw. Abnahme der beitragende Fläche und des erforderlichen Benetzungsvolumens VO_x beschreiben, müssen nun Bild 8 in der entsprechenden Zeile der anfänglich gewählten Bodengruppe entnommen werden.

Für $HQ_{2,33}$: $k_{\text{Vox}2,33} = 0,5$; $k_{\text{Fix}2,33} = 0,8$;
für HQ_{100} : $k_{\text{Vox}100} = 1,3$; $k_{\text{Fix}100} = 1,15$.
Damit wird $FL_{\text{eff}2,33} = 1,4 \text{ km}^2$ und $FL_{\text{eff}100} = 2,1 \text{ km}^2$ sowie $VO_{2,33} = 12,5 \text{ mm}$ und $VO_{100} = 32,5 \text{ mm}$. Es folgt wiederum die Bestimmung der Regenintensität analog Punkt D, wobei nun natürlich auch T_2 geringfügige Änderungen erfährt ($T_{2x} = FL_{\text{eff}x}^{0,2}$). Das führt zu $r_{2,33} = 17,4 \text{ mm/Std.}$ und $r_{100} = 63 \text{ mm/Std.}$ Damit erhält man $HQ_{2,33} = 6,9 \text{ m}^3/\text{s}$ und $HQ_{100} = 38 \text{ m}^3/\text{s}$.

Von diesem Einzugsgebiet existiert eine 17jährige Abflussmessreihe. Als Kontrolle liefert die Schätzung der entsprechenden Grössen mittels einer extrem-

wertstatistischen Auswertung folgende Werte: $HQ_{2,33} = 7,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $HQ_{20} = 17,6 \text{ m}^3/\text{s}$, $HQ_{100} = 31 \text{ m}^3/\text{s}$.

eventuell g) *Restrisiken abschätzen*: In entsprechenden Fällen müssen *Sicherheitsfaktoren* festgelegt werden.

Grenzen der Anwendung, Schlussbemerkung

Entsprechend den Voraussetzungen und den zur Eichung verwendeten Daten gelten die folgenden *Modellannahmen* und *Randbedingungen*:

- Der Anwendungsbereich der Formel erstreckt sich auf Einzugsgebiete mit einer Fläche von etwa 2 bis 100 km^2 .
- Die Erhebung des Gerinnenetzes erfolgt aus den in der Landeskarte 1:25 000 aufgenommenen Gräben und Bächen.
- Der zivilisatorische Einfluss ist vernachlässigbar, d.h., der Anteil an befestigter (überbauter) Fläche oder Einrichtungen wie künstlich angelegte Be- und Entwässerungssysteme verändern den Wasserhaushalt des betrachteten Gebiets während des Hochwassers nicht massgeblich. Ebenso ist die Anwendbarkeit der Methode auf Gebiete beschränkt, in denen Wasserentnahmen zu Speicherzucken mengenmässig auf den zu erwartenden Spitzenabfluss nicht ins Gewicht fallen.

Die Anwendung der Methode wird zeigen, ob sie den Bedürfnissen der Praxis gerecht wird. Jede weitergehende Modifikation einer Hochwasserformel auf der Basis von einzugsgebietsspezifischen Parametern bedingt, dass umfangreichere Eichgrundlagen mit Angaben über deren Genauigkeit zur Verfügung stehen. Insbesondere sollten vermehrt Anstrengungen unternommen werden, in möglichst vielen Gebieten Abflussmessungen durchzuführen.

Literatur

- [1] Bürkli-Ziegler, A.: Grösste Abflussmengen bei städtischen Abzugskanälen. Tech. Mitt. des Schweiz. Ingenieur- & Architektenvereins, Orell Füssli, Zürich 1980, S. 68 ff
- [2] Chow, V.T.: Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill, 1964
- [3] Eidg. Justiz- u. Polizeidepartement, Eidg. Volkswirtschaftsdepartement, Eidg. Departement des Innern: Bodeneignungskarte der Schweiz 1:200 000. EDMZ, Bern 1980
- [4] Hofbauer, R.: Eine neue Formel für die Ermittlung der grössten Hochwassermengen. Österr. Wochenschr. f. d. öffentl. Baudienst, Wien 1916, S. 38–40
- [5] Horton, R.E.: The role of infiltration in the hydrological cycle. Trans. Am. Geophys. Un., 14, 1933, S. 446–460
- [6] Kölla, E.: Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessung. Mitt. Nr. 87 Versuchsanst. f. Wasserbau, Hydrologie u. Glaziologie, ETH Zürich 1986, S. 163 ff
- [7] Kürstener, L.: Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur an der Plessur bei Lünen. Schweiz. Bauzeitung, 1, 1917, S. 4–8
- [8] Lauterberg, R.: Anleitung zur Berechnung der (mitteleuropäischen) Quellen- und Stromabflussmengen aus der Regenmenge, Grösse und Beschaffenheit der Quellen- und Flussgebiete. Allgemeine Bauzeitung, Wien, 1887, S. 9–13, S. 17–20, S. 27–30
- [9] Melli, E.: Die Dimensionierung städtischer Kanäle. Schweiz. Bauzeitung 12 (1924) S. 137–141
- [10] Müller, R.: Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen. Mitt. Nr. 4 Versuchsanst. f. Wasserbau u. Erdbau, ETH Zürich 1943, S. 188 ff
- [11] Taubmann, K.-C.: Ingenieurhydrologische Hochwasserabschätzung. Wasser, Energie, Luft 10 (1986) S. 277–281
- [12] Zeller, J.; Geiger, H.; Röhliberger, G.: Starkniederschläge des Schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. 5 Bde. Eidg. Anst. f. d. forstl. Versuchswesen, Birmensdorf, 1976–1983
- [13] Zuidema, P.: Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen. Mitt. Nr. 79 Versuchsanst. f. Wasserbau, Hydrologie u. Glaziologie, ETH Zürich 1985, S. 149 ff

Adresse der Verfasserin: Dr. Elisabeth Kölla, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.