Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 89 (1997)
Heft: 5-6

Artikel: Hochwasserabschätzung
Autor: Weingartner, Rolf / Manser, Stefan
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940188

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: 28.12.2025

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

Möglichkeiten und Grenzen der

Hochwasserabschätzung

in kleineren schweizerischen Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen

Rolf Weingartner und Stefan Manser

Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden in der Schweiz mehrere Hochwasserabschätzverfahren entwickelt, die sich für den Einsatz in kleineren Einzugsgebieten eignen. Der vorliegende Aufsatz stellt diese Modelle kurz vor. Aus der Beurteilung der einzelnen Modelle geht hervor, dass von den beiden Modellen Fuzzy und GIUB96 die besten Ergebnisse zu erwarten sind. Durch die kombinierte Anwendung mehrerer Modelle lässt sich die Aussagekraft der Abschätzung wesentlich erhöhen.

1. Einleitung

Die Abschätzung seltener Hochwasser mit Jährlichkeiten zwischen etwa 20 und 200 Jahren hat in den letzten Jahren entscheidende Impulse erhalten: Einerseits wurden mehrere neue Verfahren zur Hochwasserabschätzung entwickelt, welche teilweise auf älteren, schon seit Jahrzehnten bestehenden Ansätzen aufbauen (vgl. *Weingartner* und *Spreafico* 1990). Deren besonderes Kennzeichen ist der Versuch, die real ablaufenden Prozesse bei der Modellkonzeption besser zu berücksichtigen. Andererseits wird die Hochwasserbemessung durch das neue Wasserbaugesetz, das seit dem 1. Januar 1993 in Kraft ist, flexibler gestaltet. Gefordert ist eine Differenzierung der Schutzziele in Funktion der zu schützenden Werte und Objekte. Der früher übliche generelle Ausbau auf ein Jahrhunderthochwasser (HQ_{100}) hat ausgedient (vgl. *Loat* und *Willi* 1995).

In der Bemessungspraxis stellt sich immer wieder die Frage, mit welchem Verfahren sich die Spitzenabflussmengen möglichst zuverlässig abschätzen lassen. Oftmals wird dabei auch heute noch sehr pragmatisch vorgegangen: Es werden einfache, eingespielte Verfahren eingesetzt, die mit möglichst geringem Zeitaufwand zu einer Hochwasserabschätzung in jenen Einzugsgebieten führen, die über keine oder nur wenige Messdaten verfügen. Den zunehmenden Genauigkeitsansprüchen genügen diese einfachen Modelle in der Regel nicht mehr (*Lang* 1992). Welche Modelle sind aber zu wählen, um zu möglichst zuverlässigen Ergebnissen zu gelangen? Der vorliegende Aufsatz soll zur Beantwortung dieser Frage beitragen. Ziel der Ausführungen ist es, die in den letzten Jahren in der Schweiz entwickelten Hochwasserabschätzverfahren vergleichend zu analysieren, um daraus eine Empfehlung für die Hochwasserbemessung in mesoskaligen, 10 bis etwa 200 km² grossen Einzugsgebieten abzuleiten. Folgende Modelle werden berücksichtigt:

- Modell Kölla (*Kölla* 1986)
- Modell Kölla$_{mod}$ (Weiterentwicklung von *Manser* 1996)
- Modell Momente (*Sydler* et al. 1982, Weiterentwicklung *Düster* 1994)
- Modell Regression (*Düster* 1994)
- Modell Fuzzy (*Düster* 1994)
- Modell GIUB96 (*Weingartner* 1996)

Bei diesen Modellen, die im nächsten Kapitel kurz vorgestellt werden, handelt es sich um sogenannte regionalhydrologische Modelle. Solche Modelle sind deutlich von deterministischen White- und Grey-Box-Modellen zu unterscheiden. Sie beschreiben die räumliche Variabilität hydrologischer Grössen im Raum und ermöglichen es damit, hydrologische Grössen in mesoskaligen Einzugsgebieten ohne Abflussmessungen abzuschätzen. Die Eichung dieser Modelle erfolgt – auf der Grundlage von Einzugsgebieten, die über Messdaten verfügen – durch die Koppelung von unabhängigen Gebietskenngrössen mit der abhängigen hydrologischen Grösse. Im Gegensatz dazu werden die meist in mikroskaligen Einzugsgebieten (< 10 km²) eingesetzten White- und Grey-Box-Modelle mit Hilfe von Niederschlags-Abfluss-Ereignissen kalibriert.

2. Regionalhydrologische Hochwassermodelle

Bei den regionalhydrologischen Hochwassermodellen ist grundsätzlich zwischen regional-taxonomischen Ansätzen und regionalen Übertragungsfunktionen zu unterscheiden. Bei regional-taxonomischen Ansätzen werden Raumeinheiten oder Einzugsgebiete nach Massgabe einer Ähnlichkeitsdefinition zu Regionen oder Raumtypen zusammengefasst. Die Modelle Fuzzy und GIUB96 sind dieser Verfahrensgruppe zuzuordnen. Bei den regionalen Übertragungsfunktionen wird die räumliche Variabilität einer hydrologischen Grösse mathematisch formuliert, wie das Beispiel des Modells Regression verdeutlicht (Formel 1):

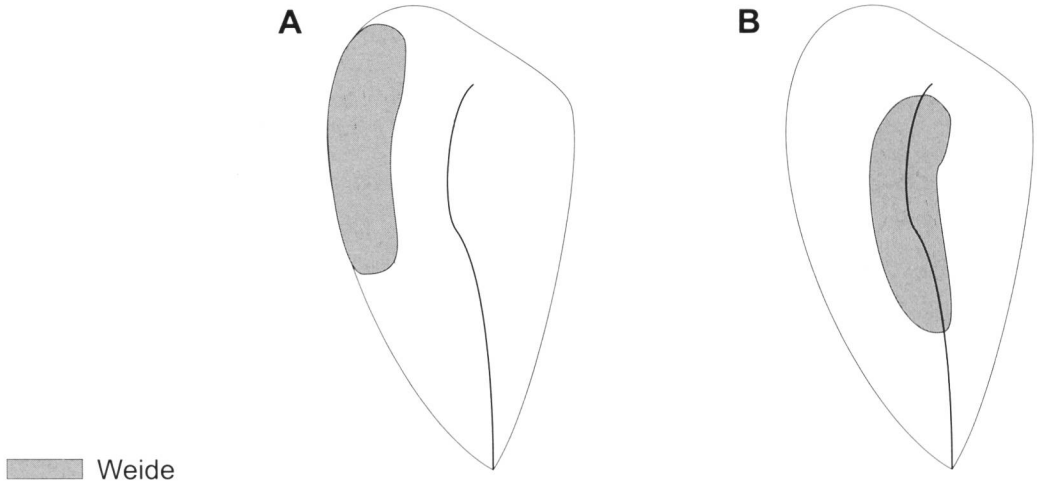
$$HQ_{100} = Fn_{beitr}^{0,7834} \cdot 10^{0,0348 \cdot \sqrt{N} + 0,0069 \cdot WSV - 1,0959} \qquad (1)$$

HQ_{100} 100jährliches Hochwasser [m³/s]
Fn_{beitr} beitragende Fläche [km²]
N Jahresniederschlag [mm], prozessorientiert berechnet
WSV mittleres Wasserspeicherungsvermögen [mm], prozessorientiert berechnet

Bei beiden Verfahrensgruppen spielen Gebietskenngrössen eine herausragende Rolle. Im Rahmen des «Hydrologischen Atlasses der Schweiz» wurden solche Gebietskenngrössen umfassend und systematisch für die schweizerischen Einzugsgebiete erhoben (*Breinlinger*, *Gamma* und *Weingartner* 1992). Weitere Untersuchungen zielten darauf hin, die Erhebung der Gebietskenngrössen für den Hochwasserfall zu verbessern (*Düster* und *Weingartner* 1993). Dabei wird davon ausgegangen, dass alle Gebietsteile zu einem Hochwasser beitragen, dies jedoch in einem unterschiedlichen Ausmass, das durch den relativen Flächenbeitrag erfasst wird. Der relative Flächenbeitrag beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Raumelement zum Hochwasserabfluss beiträgt. Diese Wahrscheinlichkeit lässt sich mit GIS-Unterstützung über die beiden Faktoren «Distanz zum nächstgelegenen Gerinne» und «Gefälleverhältnisse» in vereinfachter, an die Datenlage in mittelgrossen schweizerischen Einzugsgebieten angepasster Form bestimmen (*Düster* 1994). Der relative Flächenbeitrag fliesst als Gewichtungsfaktor in die Erhebung der Gebietskenngrössen ein (Formel 2). Auf diesen prozessorientiert berechneten Gebietskenngrössen basieren die Modelle Kölla$_{mod}$, Fuzzy, Momente und Regression.

$$\overline{P}_j(gew.) = \frac{\sum_{i=1}^{n} g_i P_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} g_i} \qquad (2)$$

$\overline{P}_j$ *(gew.)* Flächenanteil der Gebietskenngrösse P_j bei prozessorientierter Berechnung
P_{ij} Ausprägung der j-ten Gebietskenngrösse im i-ten Raumelement



	Weideanteil konventionell, ohne Berücksichtigung des relativen Flächenbeitrages	Weideanteil mit Berücksichtigung des relativen Flächenbeitrages
Fall A	20 %	10 %
Fall B	20 %	55 %

Bild 1. Konventionelle (ungewichtete) und prozessorientierte (gewichtete) Berechnung von Gebietskenngrössen (fiktives Beispiel).

g_i relativer Flächenbeitrag des *i*-ten Raumelementes
n Anzahl Raumelemente/Teilflächen eines Einzugsgebietes

Bild 1 verdeutlicht die Unterschiede zwischen konventioneller und prozessorientierter Erhebung der Gebietskenngrössen: In den beiden Einzugsgebieten A und B befindet sich nach konventioneller Berechnung eine Weidefläche, die 20 % des Einzugsgebietes bedeckt. Durch die Berücksichtigung der relativen Flächenbeiträge wird die gerinnenahe Weidefläche im Einzugsgebiet B weit stärker gewichtet (55 %) als im Gebiet A (10 %), so dass die Weidefläche im Gebiet B aus hochwasserhydrologischer Sicht als wichtiger eingestuft wird.

2.1 Modelle Kölla und Kölla$_{mod}$

Das Laufzeitverfahren, das sich in der Kanalisationstechnik bewährt hat, ist auch in der Hydrologie sehr beliebt. Den vielen Varianten des Verfahrens gemeinsam ist die Vorstellung der sogenannten Konzentrations- oder Anlaufzeit. Sie basiert auf der anschaulichen Annahme, dass der Hochwasserabfluss dann maximal ist, wenn das ganze Einzugsgebiet bzw. dessen hochwasserrelevanten Teile zum Abfluss beitragen. In der Arbeit von *Kölla* (1986) wurde die einfache Form des Laufzeitverfahrens (Formel 3)

$$HQ_x = r_x(t_c) \cdot \psi_s \cdot Fn \qquad (3)$$

HQ_x x-jährlicher Spitzenabfluss
r_x x-jährliche Niederschlagsintensität der Dauer t_c
t_c Konzentrationszeit des Einzugsgebietes
ψ_s Spitzenabflussbeiwert
Fn Gebietsfläche
x Wiederkehrperiode

weiterentwickelt zu (Formel 4):

$$HQ_x = \left(r_x\left(t_{c(x)}\right) + r_s - f_x\right) \cdot \left(FL_{eff(x)} + FL_b\right) \cdot k_{gang} \cdot \frac{1}{3{,}6} + Q_{vgl(x)} \qquad (4)$$

HQ_x x-jährlicher Spitzenabfluss [m³/s]
r_x x-jährliche Niederschlagsintensität [mm/h] eines Blockregens der Dauer t_c
t_c Konzentrationszeit [h] mit $t_c = t_1 + t_2$
t_1 Benetzungszeit [h]
t_2 Laufzeit im Gerinne [h]
r_s Schmelzwasseräquivalent der Schneedecke [mm/h]
f Verluste [mm/h]
FL_{eff} beitragende Flächen[1] [km²]
FL_b versiegelte Flächen [km²]
k_{gang} beschreibt den abflusserhöhenden Effekt, der bei der Verwendung einer Niederschlagsganglinie anstelle eines Blockregens entstehen würde [–]
Q_{vgl} Abfluss aus den vergletscherten Teilen des Einzugsgebietes [m³/s]
x Wiederkehrperiode

Grundlegende Merkmale des Ansatzes Kölla sind:

- Das Verfahren basiert auf dem Konzept der beitragenden Flächen, das heute weitgehend akzeptiert ist. Die Ausdehnung der beitragenden Flächen variiert mit der Jährlichkeit der Hochwasserereignisse. «Ein Hochwasser entsteht aus einem Regen bestimmter Intensität, der auf hydraulisch angeschlossene Flächen fällt und von dort – abzüglich des Verlustanteils an den Untergrund und an die Erweiterung der gerinnenahen Sättigungszone – zum Gerinne und schliesslich zum Kontrollquerschnitt abfliesst. Hochwasserspitze, Regenintensität, effektiv beitragende Fläche und evtl. der Verlust sind Funktion einer gewählten Jährlichkeit x» (*Kölla* 1986).
- Die Abschätzformel verwendet den Abflussbeiwert nicht explizit.
- Das Modell erlaubt primär Abschätzungen von 20jährlichen Spitzenabflüssen in 1 bis 100 km² grossen Einzugsgebieten; überdies bestehen Umrechnungs- bzw. Extrapolationsmöglichkeiten auf ein 2,33jährliches (mittleres) und ein 100jährliches Hochwasser.

Das Modell Kölla ist nicht auf Geographische Informationssysteme angewiesen; die benötigten analogen Grund-

[1] Zur Unterscheidung der beiden in dieser Arbeit diskutierten Verfahren zur Berechnung der Ausdehnung der beitragenden Flächen werden unterschiedliche Abkürzungen verwendet:
FL_{eff} Beitragende Flächen berechnet nach *Kölla* (1986)
Fn_{beitr} GIS-gestützte Berechnung gemäss den Ausführungen in Kapitel 2.

lagen – Bodeneignungskarte 1:200 000, Landeskarte 1:25 000, Informationen zu den Starkniederschlagsverhältnissen – sind gesamtschweizerisch verfügbar. Das erforderliche Benetzungs- bzw. Regenvolumen [v_o] stellt im Verfahren Kölla eine Schlüsselgrösse dar. Für den Bemessungsfall lässt sich v_o auf der Grundlage der Bodeneignungskarte 1:200 000 ableiten. Die entsprechenden Entscheidungsgrundlagen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Die Erfahrung zeigt, dass bei der Zuordnung eines Einzugsgebietes zu einer Klasse (A, B,.., F; s. Tabelle 1) ein grosser Freiraum für subjektive Entscheide besteht, so dass die Ergebnisse je nach Anwenderin oder Anwender stark schwanken können. Wird beispielsweise der Taschinasbach (Prättigau), der grundsätzlich den Flysch-/Bündnerschieferlandschaften angehört, dem Basiswert D zugeordnet (vgl. Tabelle 1), erhält man einen 20jährlichen Spitzenabfluss von 71,2 m³/s; eine Zuordnung zur Klasse C (⇒ starkes Relief) ergibt einen Wert von 82,1 m³/s, eine Zuordnung zur Klasse B (⇒ flachgründigere Böden) gar einen Wert von 95,8 m³/s. Zur Objektivierung des interessanten Verfahrens von Kölla schlagen wir deshalb eine GIS-gestützte Bestimmung von v_o vor (Modell Kölla$_{mod}$). Sie basiert auf der Annahme, dass das erforderliche Benetzungsvolumen v_o mit der Bodentiefe zunimmt. Die Bodentiefe wird aus der auch digital verfügbaren Bodeneignungskarte prozessorientiert nach Formel 2 bestimmt. Die derart objektiv ermittelte Bodentiefe wird anschliessend in den von Kölla für v_o aufgespannten Wertebereich (20 mm ≤ $v_{o(20)}$ ≤ 45 mm) umgerechnet (Formel 5):

$$v_{O(20)} = 17{,}5 + 0{,}225 \cdot soil \qquad (5)$$

$v_{o(20)}$ Für ein 20jährliches Hochwasser erforderliches Benetzungsvolumen [mm]

soil Bodentiefe [cm], prozessorientiert berechnet (nach Formel 2)

Zusätzlich wird im modifizierten Verfahren Kölla$_{mod}$ eine Abminderung des Niederschlags, die sich beim Übergang vom Punkt- zum Gebietsniederschlag ergibt, eingeführt. Dieser Abminderungsfaktor erhält aufgrund der Resultate der Modelleichung einen Wert von 0,7. Die Objektivierung des Verfahrens muss allerdings mit einem beträchtlichen Mehraufwand gegenüber dem originalen Modell erkauft werden (Digitalisierung des Gewässernetzes, GIS-Einsatz).

2.2 Modelle Regression und Momente

Die in den Kapiteln 2.2 bis 2.4 vorgestellten Modelle wurden alle in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern entwickelt bzw. weiterentwickelt. Das Modell Regression ist in Formel 1 beschrieben; aus dem umfangreichen Prädiktorenvariablensatz wurden bei der Modellkalibrierung die beitragende Fläche, der Jahresniederschlag und das mittlere Wasserspeicherungsvermögen als signifikante Modellgrössen erkannt. Während das Regressionsmodell eine Abschätzung 100jährlicher Hochwasserspitzen erlaubt, ist das Modell Momente weitaus flexibler. Mit ihm werden die beiden Parameter der hydrologischen Grundgleichung – mittlere Hochwasserspitze *mHQ* und Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen *s(HQ)* – geschätzt, so dass sich

Tabelle 1. Grundlagen zur Anwendung des Modells Kölla; Bestimmung des erforderlichen Regenvolumens [v_o] für ein 20jährliches Hochwasser (aus *Kölla* 1986).

Landschafts-charakteristik	Alpine kristalline Berglandschaften		Alpine Kalk-Berglandschaften		Flysch-/Bündnerschieferlandschaften		Voralpine Nagelfluhlandschaften		Molasselandschaften des Mittellandes		Jura-Kalklandschaften	
	Standard	Trogtäler mit Talschotter	Standard	Trogtäler mit Talschotter	Standard	Trogtäler 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

Erforderliches Benetzungsvolumen: A: 20 mm, B: 25 mm, C: 30 mm, D: 35 mm, E: 40 mm, F: 45 mm.

dann Hochwasser beliebiger Jährlichkeiten *T* bestimmen lassen (Formel 6):

$$HQ_T = mHQ + K_T \cdot s(HQ) \tag{6}$$

HQ_T *T*-jährliches Hochwasser
mHQ mittlere Jahreshochwasserspitze
K_T Koeffizient, von der Jährlichkeit und der Verteilungsfunktion abhängig
s(HQ) Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen

Die Momentenschätzung wurde in der Schweiz erstmals von *Sydler, Widmoser* und *Zollinger* (1982) vorgenommen. *Düster* (1994) berechnete die beiden Momente *mHQ* und *s(HQ)* auf der Basis verbesserter Grundlagendaten (prozessorientierte Gebietskenngrössen) neu (Formel 7 und 8). Zur Kalibrierung verwendete er rund neunzig Einzugsgebiete mit Flächen zwischen 10 und 200 km²:

$$mHQ = \frac{Fn_{beitr}^{0,8898}}{(Vgl+1)^{0,1573}} \cdot 10^{b} \tag{7}$$

$$\text{mit } b = 0{,}0372 \cdot \sqrt{N} - 0{,}1086 \cdot \sqrt{Im} + 0{,}008 \cdot Oed + 0{,}0043 \cdot WSV - 1{,}1434$$

$$s(HQ) = Fn_{beitr}^{0,812} \cdot 10^{0,0004 \cdot N + 0,0067 \cdot Im - 1,0737} \tag{8}$$

mHQ mittlere Jahreshochwasserspitze [m³/s]
s(HQ) Standardabweichung der Jahreshochwasserspitzen [m³/s]
Fn_{beitr} beitragende Fläche [km²]
Vgl Vergletscherungsgrad [%]
N Jahresniederschlag [mm], prozessorientiert berechnet
Im mittlere Hangneigung [°], prozessorientiert berechnet
Oed Ödlandanteil [%], prozessorientiert berechnet
WSV mittleres Wasserspeicherungsvermögen [mm], prozessorientiert berechnet

2.3 Das Modell Fuzzy

Das Modell Fuzzy lässt sich grundsätzlich in vier Teile bzw. Teilschritte gliedern:

1. Parametrisierung der Einzugsgebiete
Modellierung der beitragenden Flächen und Berechnung prozessorientierter Gebietskenngrössen nach Formel 2.

2. Klassifikation
Beim Modell Fuzzy handelt es sich um ein regional-taxonomisches Verfahren. Auf der Grundlage der Verteilungsfunktionen der Hochwasserspitzen von rund neunzig 10 bis 200 km² grossen Einzugsgebieten mit Messreihen ≥10 Jahren hat *Düster* (1994) ein Verfahren zur Bildung homogener Hochwasserklassen entwickelt. Eine homogene Hochwasserklasse zeichnet sich dadurch aus, dass die Verteilungsfunktionen der Einzugsgebiete, welche dieser Klasse angehören, mit der mittleren, repräsentativen, klassenspezifischen Verteilungsfunktion identisch sind, d.h., dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Verteilungsfunktionen und der repräsentativen Verteilungsfunktion nur zufallsbedingt sind. Insgesamt wurden nach diesem Verfahren gesamtschweizerisch zwölf Hochwasserklassen ausgeschieden.

3. Räumliche Einordnung der Hochwasserklassen
Zur Abschätzung seltener Hochwasser müssen die Einzugsgebiete ohne Abflussmessungen einer der zwölf Hochwasserklassen zugeordnet werden, um mit den klassenspezifischen Werten der beiden Parameter *mHQ* und *s(HQ)* unter Verwendung von Formel (6) ein *T*-jährliches Hochwasser berechnen zu können. Dazu wurden – basierend auf den im ersten Teilschritt berechneten Gebietskenngrössen – Diskriminanzfunktionen bestimmt, welche die zwölf Hochwasserklassen trennen.

4. Berechnung von Klassifizierungswahrscheinlichkeiten
Soll nun für ein Einzugsgebiet ohne Abflussmessungen eine Hochwasserabschätzung durchgeführt werden, kann das Einzugsgebiet über die Diskriminanzfunktionen einer der zwölf Klassen zugeteilt werden. Durch die diskrete Zuordnung eines Einzugsgebietes zu einer einzelnen Hochwasserklasse bleibt allerdings unberücksichtigt, dass die Übergänge zwischen den Hochwasserklassen fliessend sind, so dass ein Einzugsgebiet mehreren Klassen angehören kann, dies aber mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten. Bei den «fuzzy sets» werden diese Unschärfen in die Berechnung einbezogen. Dazu müssen – ausgehend von den im dritten Teilschritt ermittelten Diskriminanzfunktionen – A-posteriori-Wahrscheinlichkeiten berechnet werden, welche die Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit eines Einzugsgebietes zu einer Hochwasserklasse beschreiben. Die A-posteriori-Wahrscheinlichkeiten fliessen als Gewichtungsfaktoren in das Bemessungsmodell (Formel 9) ein. Berechnungsbeispiele finden sich in *Düster* (1994) und *Manser* (1996).

$$HQ_T = Fn_{beitr} \sum_{g=1}^{12} P(g|Y_i) \cdot \left(mHq_g + K_T \cdot s_g(Hq)\right) \tag{9}$$

HQ_T *T*-jährliche Hochwasserspitze [m³/s]
Fn_{beitr} beitragende Fläche [km²]
$P(g|Y_i)$ A-posteriori-Wahrscheinlichkeit
mHq Mittelwert der Abflussspenden der Jahreshochwasserspitzen [m³/s]
s(Hq) Standardabweichung der Abflussspenden der Jahreshochwasserspitzen [m³/s]
K_T Koeffizient, von der Jährlichkeit und der Verteilungsfunktion abhängig
g Hochwasserklasse

Obwohl das Modell Fuzzy auf einem stochastischen Ansatz beruht, darf es als prozessnah bezeichnet werden, basiert es doch auf dem Konzept der beitragenden Fläche und operiert mit prozessorientiert abgeleiteten Gebietskenngrössen.

2.4 Modell GIUB96

Bei der Hochwasserbemessung spielen auch Grenzwertüberlegungen zu den extremen Hochwassern, die in einem Einzugsgebiet auftreten können, eine wichtige Rolle. Die Hydrologie unternimmt seit über hundert Jahren Anstrengungen, Höchsthochwasser (Q_{max}) abzuschätzen. Es sei in diesem Zusammenhang auf die Arbeiten von *Iszkowski* (1886), *Lauterburg* (1887), *Hofbauer* (1916), *Kürsteiner* (1917), *Melli* (1924) und *Kreps* (1952) verwiesen, welche – ausgehend von den grössten in einem Einzugsgebiet beobachteten Hochwasserspitzen *(HHQ)* – in der Regel sogenannte Umhüllende der Form

$$Q_{max} = a \cdot Fn^{b} \tag{10}$$

Q_{max} extremes Hochwasser, Höchsthochwasser
Fn Gebietsfläche
a, b Parameter

bestimmten. Während diese Untersuchungen auf kleineren Stichproben beruhten, verfügen wir heute über eine umfangreiche, räumlich breit abgestützte Datenbasis (ASF

1974, *Spreafico* und *Stadler* 1986, *Spreafico* und *Aschwanden* 1991) mit über 700 *HHQ*-Werten aus dem Zeitraum 1869 bis 1990. In Bild 2 sind diese Beobachtungen der Gebietsfläche gegenübergestellt. Augenfällig ist die scharfe Obergrenze der *HHQ*-Werte; sie verdeutlicht, dass ein flächenabhängiger Grenzwert Q_{max} existiert und motiviert, mit Hüllkurven zu arbeiten.

Aus der Regression zwischen den *HHQ*-Werten und der Gebietsfläche lässt sich die Kenngrösse $HHQ_{50\%}$ ableiten. Dabei handelt es sich um jenen flächenabhängigen Wert, der in der Grundgesamtheit in 50 % der Fälle über- bzw. unterschritten wird. Mit Wahrscheinlichkeitsüberlegungen lässt sich zeigen, dass sich dieser Wert in der Grössenordnung eines 100jährlichen Hochwassers bewegt (*Weingartner* 1996). Die Regressionsgerade $HHQ_{50\%}(Fn)$ beschreibt den für eine bestimmte Fläche zu erwartenden *HHQ*-Wert. Die starke Flächenabhängigkeit der *HHQ*-Werte überdeckt allfällig vorhandene regionale Muster im Hochwasserverhalten. Die Differenz zwischen dem tatsächlich beobachteten und dem aus der Gebietsfläche berechneten Wert ergibt das von der Fläche unabhängige Residuum. Ein positives Residuum bedeutet, dass im betrachteten Einzugsgebiet ein höherer Extremabfluss beobachtet wurde, als allein aufgrund der Gebietsfläche zu erwarten wäre, dass also in diesem Gebiet abflussfördernde Faktoren vorherrschen. Im Residuum gelangen demnach die spezifischen flächenunabhängigen Eigenschaften eines Einzugsgebietes zum Ausdruck. Einzugsgebiete mit Residuen, die in derselben Grössenordnung liegen, weisen ein vergleichbares extremes Hochwasserverhalten auf. Es wurden daher Einzugsgebiete mit ähnlichen Residuen zu Regionen zusammengefasst, wobei die Regionen vor allem unter dem Gesichtspunkt der Minimierung der Streuung der Residuen innerhalb einer Region festgelegt wurden (Bild 3).

Mit diesen Grundlagen können nun für jede der fünfzehn Regionen Q_{max} und HQ_{100} geschätzt werden (Bild 4). Als unabhängige Grössen werden die Gebietsfläche *(Fn)* oder der mittlere Jahresabfluss (*MQ*) verwendet, so dass jeweils zwei Abschätzungen möglich sind.

Infolge der Minimierung der Wertestreuung ist die Aussagekraft der regionenspezifischen Modelle wesentlich besser als jene des Globalmodells, welche auf den *HHQ*-Werten der gesamten Schweiz beruht (Bild 2). Mit dem regional angepassten Modell GIUB96 lassen sich also schnell sowohl Grenzabflüsse, die nur selten überschritten werden, als auch 100jährliche Hochwasserspitzen abschätzen, und zwar mit einer Genauigkeit, die in der Grössenordnung der prozessorientierten Verfahren liegt (s. Kap. 3)!

3. Modellbeurteilung und -vergleich

Die Beurteilung der vorgestellten mesoskaligen Hochwasserabschätzverfahren beruht auf den Erkenntnissen, welche bei der Abschätzung seltener Hochwasserspitzen in 69 schweizerischen Einzugsgebieten mit Flächen zwischen 10 und 100 km² gewonnen wurden. Um den Modellvergleich übersichtlicher zu gestalten, basiert die Modellbeurteilung ausschliesslich auf 100jährlichen Hochwassern. Da die Spitzenabflüsse der 69 Gebiete in der Regel zur Eichung der Modelle mitverwendet wurden, bestehen für alle Modelle dieselben Rahmenbedingungen. Zusätzlich wurde in 18 Einzugsgebieten eine sogenannte Out-sample-Überprüfung durchgeführt. Die Beurteilung der Modellgüte erfolgte auf der Basis von zwei Vergleichswerten; es sind dies die von der Landeshydrologie und -geologie publizierten 100jährlichen Hochwasserspitzen (*Aschwanden* und *Spreafico* 1995), welche mehrheitlich mittels der Log-Pearson-III-Verteilung extrapoliert wurden, und die mit Hilfe der Gumbel-Verteilung extrapolierten Spitzenabflüsse (*Düster* 1994). Dazu ist allerdings zu bemerken, dass auch die Vergleichswerte aus verschiedenen Gründen (*P/Q*-Beziehung, Unsicherheiten der zeitlichen Extrapolation) mit Unsicherheiten behaftet sind.

Als wichtigste Kriterien zur Beurteilung der Modellgüte wurden verwendet:

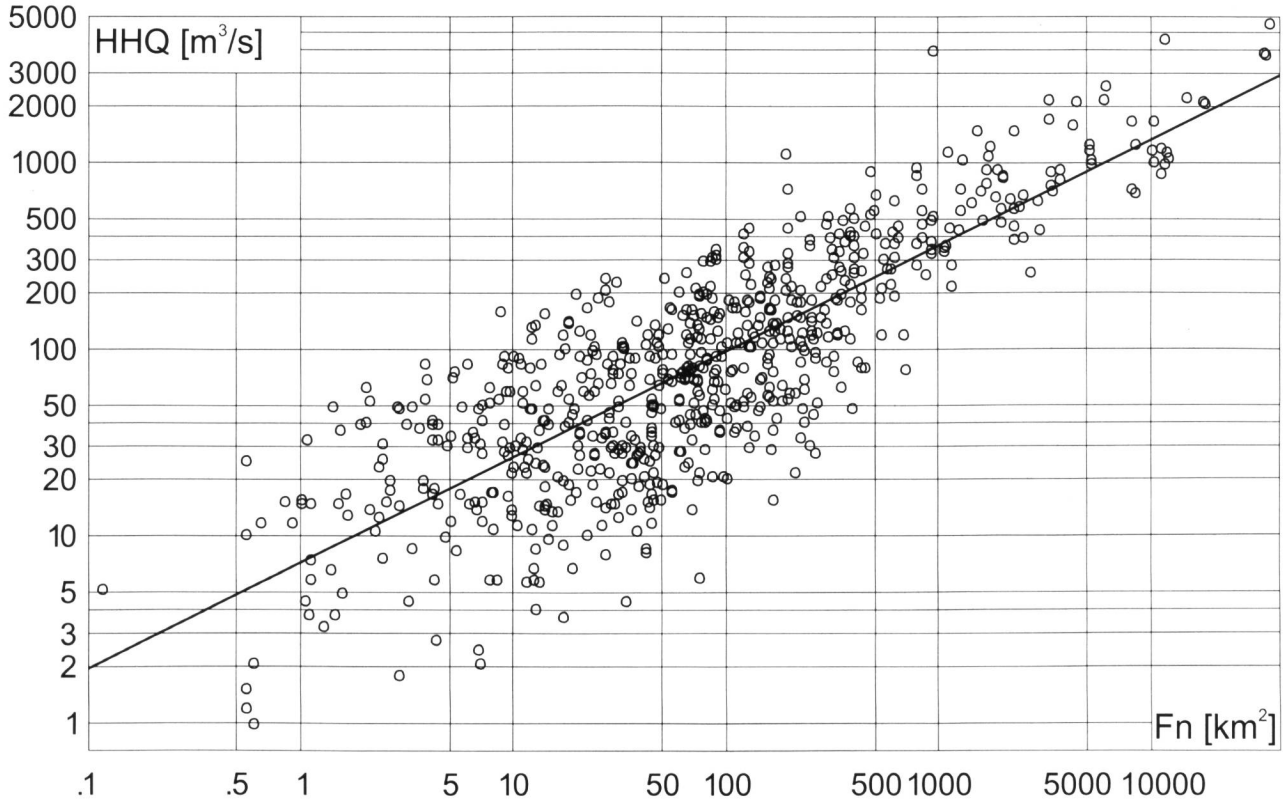


Bild 2. Zusammenhang zwischen den grössten beobachteten Hochwasserabflüssen *(HHQ)* und der Gebietsfläche *(Fn)*.

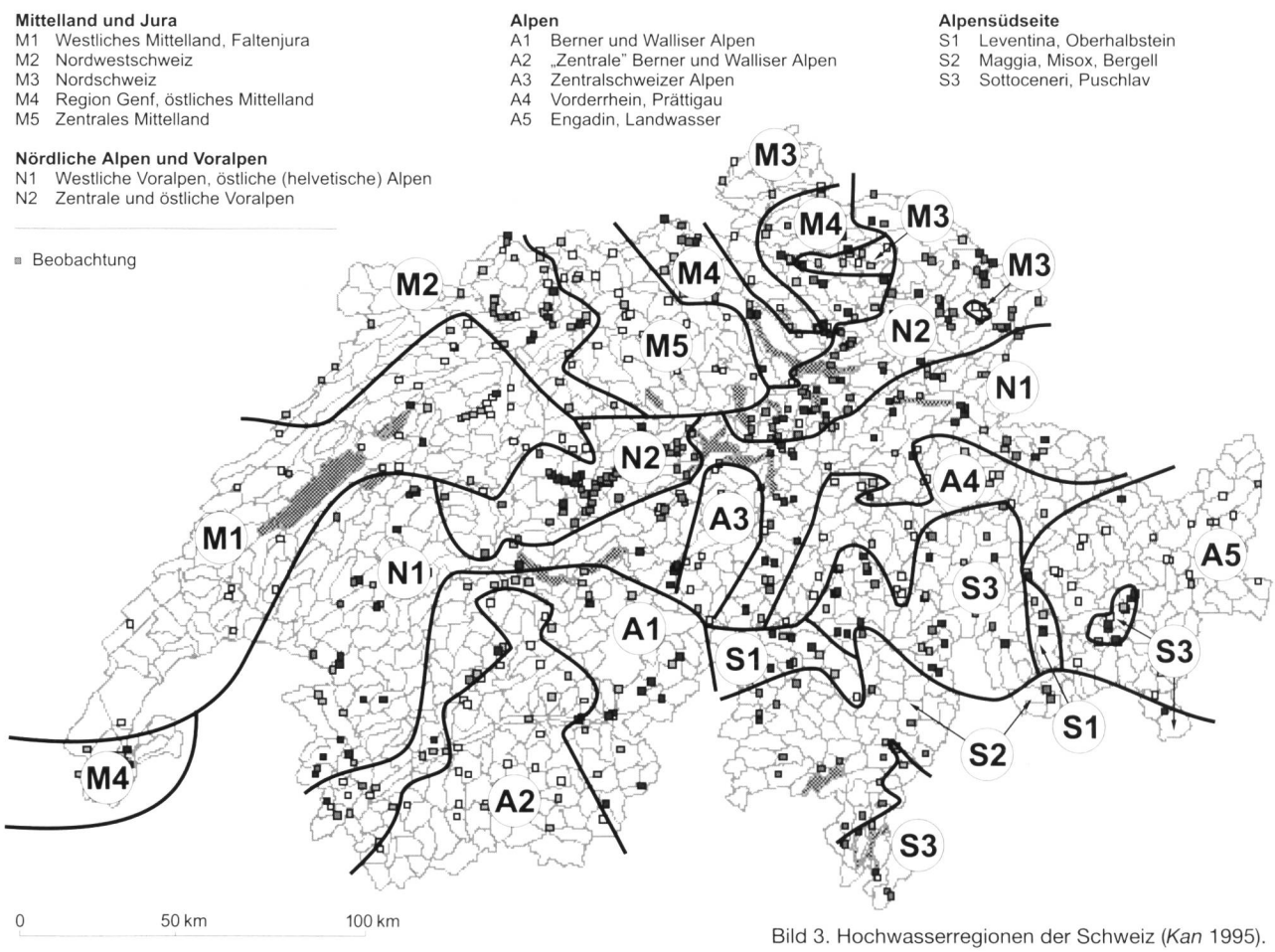
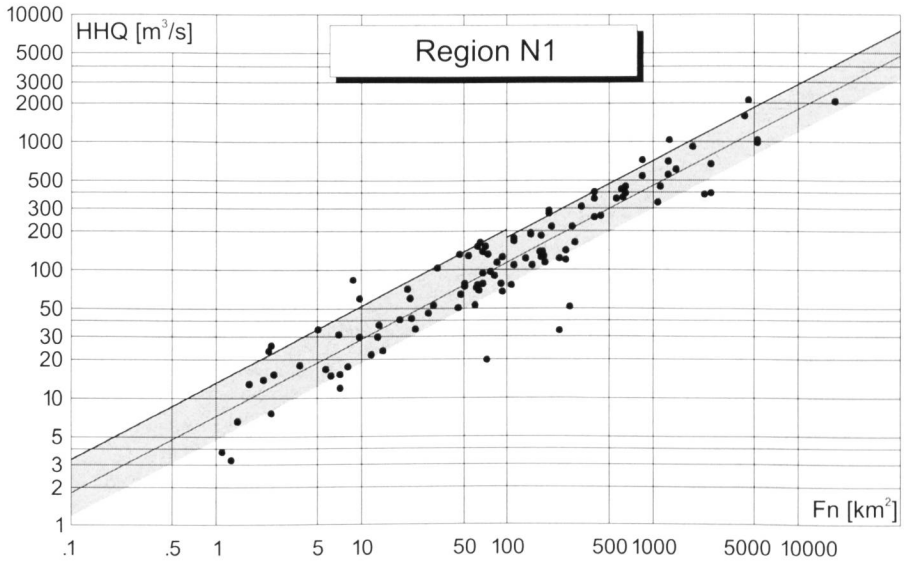


Bild 3. Hochwasserregionen der Schweiz (*Kan* 1995).

- *Konfidenzintervalle* der extrapolierten 100jährlichen Spitzenabflussmengen (Berechnung s. *Kaller* und *Riebe* 1979): Liegt ein modellierter Wert über dem Vertrauensintervall, gilt er als überschätzt, liegt er unterhalb, gilt er als unterschätzt.
- Das *Bewertungsschema* von *Naef* (1983), das auf der nach unserer Meinung richtigen Annahme beruht, dass es bei der Dimensionierung um die Festlegung einer Grössenordnung der Abflussspitzen geht und deshalb Abweichungen vom «wahren» Wert bis zu einem gewissen Mass tolerierbar sind. Für die Modellbeurteilung wurden als erstes die prozentualen Abweichungen der modellierten Werte von den Vergleichswerten bestimmt.

Als Vergleichswerte verwendeten wir das Mittel der nach der Log-Pearson-III- und der Gumbel-Verteilung extrapolierten 100jährlichen Spitzenabflüsse. Anschliessend wurden die Abweichungen wie folgt klassiert:
exakt: der modellierte Wert liegt im Bereich von 90 bis 110 % des Vergleichswerts, der auf 100 % gesetzt wird;
genügend: der modellierte Wert liegt im Bereich von 70 bis 90 % bzw. 110 bis 150 % des Vergleichswerts;
ungenügend: der modellierte Wert liegt im Bereich von 50 bis 70 % bzw. 150 bis 200 % des Vergleichswerts;
unbrauchbar: der modellierte Wert ist kleiner als 50 % bzw. grösser als 200 % des Vergleichswerts.
Der Prozentsatz der Realisierungen in den einzelnen



$Q_{max} = 13{,}18 \cdot Fn^{0.6}$ ($Fn \leq 100$ km²)
$Q_{max} = 12{,}02 \cdot Fn^{0.6}$ ($Fn > 100$ km²)
$Q_{max} = 56{,}23 \cdot MQ^{0.62}$ ($MQ \leq 3$ m³/s)
$Q_{max} = 75{,}86 \cdot MQ^{0.62}$ ($MQ > 3$ m³/s)

$HQ_{100} = 7{,}18 \cdot Fn^{0.6}$
$HQ_{100} = 41{,}14 \cdot MQ^{0.62}$

Bild 4. Grundlagen zur Abschätzung 100jährlicher Spitzenabflüsse nach dem Modell GIUB96 (Beispiel: Hochwasserregion N1), *Fn:* Gebietsfläche [km²], *MQ*: mittlerer Jahresabfluss [m³/s].

Klassen dient zur Ermittlung der Modellgüte. Eine wichtige Masszahl ist dabei die sogenannte Trefferwahrscheinlichkeit, die den Anteil der Realisierungen in den Klassen «exakt» und «genügend» beschreibt.

Die Ergebnisse der Modellbeurteilung sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Das einfach einsetzbare, praxisfreundliche Modell GIUB96 erreicht unter den vorgestellten Modellen die höchste Trefferwahrscheinlichkeit. Es fallen aber auch der hohe Anteil exakter und der geringe Anteil unbrauchbarer Schätzungen auf. Einem minimalen Aufwand bei der Abschätzung steht demnach eine «maximale» Trefferwahrscheinlichkeit gegenüber. Im Vergleich mit den anderen Modellen führt das Modell GIUB96 – zusammen mit dem Modell Fuzzy – zur geringsten Zahl an Überschätzungen. Abstriche ergeben sich durch den relativ hohen Anteil der Unterschätzungen (24,6 %), die sich in Dimensionierungsfragen sehr ungünstig auswirken können. Die Ergebnisse der Out-sample-Überprüfung fallen etwas schlechter aus: Aufgrund der Zusammensetzung der Einzugsgebiete (Gebietsfläche mehrheitlich <30 km²) kann daraus geschlossen werden, dass das Modell GIUB96 besonders in kleineren Einzugsgebieten mit Vorsicht anzuwenden ist. Allerdings liegen die zur Out-sample-Überprüfung beigezogenen Einzugsgebiete nur in zwei der fünfzehn Hochwasserklassen, so dass die Ergebnisse dieser Überprüfung nicht als repräsentativ anzusehen sind.

Auch das Modell Fuzzy führt – immer im Vergleich mit den anderen Abschätzverfahren – zu sehr guten Ergebnissen, die durch die Out-sample-Überprüfung bestätigt werden. Erwähnenswert sind der hohe Anteil exakter Schätzungen und der geringe Anteil der Unterschätzungen. Insgesamt erreicht das Modell Fuzzy sogar eine leicht bessere Bewertung als das Modell GIUB96. Erstaunlich ist aber, dass das Modell Fuzzy trotz seiner Prozessnähe, trotz der Verwendung der GIS-Technologie und trotz der Ausnützung der Möglichkeiten der «Fuzzy Logic» nicht signifikant bessere Ergebnisse liefert als das wesentlich einfacher anwendbare Modell GIUB96.

Die Modelle Regression, Momente und $Kölla_{mod}$ schneiden im Vergleich zu den Modellen GIUB96 und Fuzzy bereits schlechter ab (s. Tabelle 2). Da der Berechnungsaufwand für diese Modelle in der Grössenordnung desjenigen des Modells Fuzzy liegt, sind diese Modelle für eine breite Anwendung weniger attraktiv.

Eine abschliessende Beurteilung des originalen Modells Kölla ist wegen der subjektiven Komponente bei der Parameterbereitstellung nicht möglich. Die Modellgüte wird wesentlich von den (geographischen) Kenntnissen der Modellanwenderinnen und -anwender beeinflusst. Eine alleinige Verwendung der von Kölla ausgewiesenen Basiswerte (Tabelle 1) ist nicht zu empfehlen, wie die geringe Trefferwahrscheinlichkeit von nur rund 27 % in Tabelle 2 belegt. Allgemein scheint das Modell Kölla zu einer Überschätzung der Spitzenabflüsse zu neigen.

4. Schlussfolgerungen

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Aspekte der mesoskaligen Hochwasserabschätzverfahren zusammenfassend dargestellt. Die Tabelle soll die Praxis bei der Auswahl eines geeigneten Modells unterstützen, bei der neben der Modellgüte weitere Kriterien wie die Jährlichkeit des Spitzenabflusses, die Fläche des Untersuchungsgebietes und der Arbeitsaufwand eine wichtige Rolle spielen.

Die Abschätzungen, die mittels der vorgestellten Modelle vorgenommen werden können, haben primär den Charakter von Richtwerten, welche eine Grössenordnung angeben, in denen sich die «wahren» Hochwasserspitzen bewegen. Im Einzelfall ist zu entscheiden, ob die Genauigkeit dieser Abschätzungen genügt, konkret, ob das Risiko in Kauf genommen werden kann, dass auch bei den besten Modellen in rund einem Drittel der Fälle mit ungenauen oder unbrauchbaren Schätzungen zu rechnen ist und dass in 10 bis 20 % der Fälle die Werte signifikant unterschätzt werden können.

Interessante Perspektiven, d. h. massgebliche Verbesserungen in der Güte der Schätzungen, ergeben sich durch die kombinierte Anwendung mehrerer Modelle. Dabei geht man von der berechtigten Annahme aus, dass alle Modelle gewisse Fehler und Ungenauigkeiten aufweisen, diese aber in der Regel nicht in den gleichen Gebieten auftreten. Auf der Basis dieser Überlegungen führten wir deshalb mit verschiedenen Kombinationen der vorgestellten Modelle Abschätzungen 100jährlicher Hochwasserspitzen durch, wobei der Mittelwert der Abschätzungen als endgültiger Schätzwert verwendet wurde.

Angaben zur Güte dieser kombinierten Modelle finden sich in Tabelle 4. Die Trefferwahrscheinlichkeit liegt bei der gemeinsamen Anwendung der Modelle GIUB96 und Fuzzy bei 80 %, der Anteil unbrauchbarer Schätzungen beträgt nur noch 4 %. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die Abschätzungen durch die kombinierte Anwendung eine höhere Aussagekraft erhalten als die Richtwerte der einzelnen Modelle! Es lohnt sich also auf jeden Fall, mehrere Modelle parallel einzusetzen, um die Bemessungsgrösse besser abzusichern.

Literatur
Aschwanden, H., Spreafico, M. (1995): Hochwasserabflüsse – Analyse langer Messreihen. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.6, Bern.

Tabelle 2. Beurteilung der Hochwasserabschätzverfahren.

	Überprüfung in 69 schweizerischen Einzugsgebieten					Out-sample-Überprüfung	
Modell	Trefferwahrscheinlichkeit[1] [%]	exakte Schätzungen [%]	unbrauchbare Schätzungen [%]	überschätzt[2] [%]	unterschätzt[2] [%]	überschätzt[2] [%]	unterschätzt[2] [%]
$Kölla_{Basis}$[3]	26,5	7,4	45,6	72,5	7,2	—	—
$Kölla_{mod}$	50,7	10,1	21,7	44,9	18,9	16,7	27,8
Momente	62,3	11,6	14,5	26,1	27,5	5,6	27,8
Regression	55,1	21,7	17,4	40,6	13,0	22,2	16,7
Fuzzy	65,2	29,0	14,5	24,6	11,6	5,6	22,2
GIUB96	66,7	20,3	11,6	17,4	24,6	38,9	27,8

[1] Prozentsatz der exakten und genügenden Schätzungen
[2] Signifikanzniveau: 10 %
[3] Verwendung der in Tabelle 1 vorgeschlagenen Basiswerte

Tabelle 3. Zusammenfassende Darstellung der Hochwasserabschätzverfahren.

Modell	Zielgrösse	Gültigkeitsbereich *Fn* [km²]	Zeitlicher Aufwand	Aufwand Hard- und Software	Hauptvorteil	Hauptnachteil
$Kölla_{Basis}$[1]	$HQ_{2.33}$, HQ_{20}, HQ_{100}	1–100 km²	mittel	—	prozessorientiert	subjektive Komponente
$Kölla_{mod}$	$HQ_{2.33}$, HQ_{20}, HQ_{100}	10–100 km²	gross	gross, GIS	Objektivität	Aufwand
Momente	HQ_x[2]	10–200 km²	gross	gross, GIS	Flexibilität in der Zielgrösse	Aufwand
Regression	HQ_{100}	10–200 km²	gross	gross, GIS	einfaches Modell	nur HQ_{100} abschätzbar
Fuzzy	HQ_x	10–200 km²	sehr gross	gross, GIS	Prozessorientierung	Aufwand
GIUB96	HQ_{100}	beliebig	sehr klein	—	breite Abstützung durch Daten	nur HQ_{100} abschätzbar

[1] bei Verwendung der Basiswerte
[2] $2{,}33 \leq x < 200$

Fn Gebietsfläche
HQ Hochwasserspitzenabfluss

Tabelle 4. Gütebeurteilung der kombinierten Modelle (aufgrund einer Anwendung in 69 Einzugsgebieten).

Mittelung der modellierten HQ_{100}-Werte folgender Modelle	Trefferwahrscheinlichkeit [%]	exakt [%]	unbrauchbar [%]
GIUB96, Fuzzy	79,7	30,4	4,3
GIUB96, Fuzzy, Regression	71,0	26,1	5,8
GIUB96, Momente	69,6	24,6	4,3
GIUB96, Fuzzy, Momente	69,6	23,2	7,2
GIUB96, Fuzzy, Momente, Regression	68,1	24,6	5,8

ASF (Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau) (1974): Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern. Bern.

Breinlinger, R., Gamma, P., Weingartner, R. (1992): Kenngrössen kleiner Einzugsgebiete. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 1.2, Bern.

Düster, H. (1994): Modellierung der räumlichen Variabilität seltener Hochwasser in der Schweiz. Geographica Bernensia G44, Bern.

Düster, H., Weingartner, R. (1993): Prozessorientierte Gewinnung von Gebietskenngrössen zur hydrologischen Charakterisierung von Einzugsgebieten. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 37. Jahrgang, Heft 5/6:122–126, Koblenz.

Hofbauer, R. (1916): Eine neue Formel für die Ermittlung der grössten Hochwassermengen. In: Österreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst: 38–40, Wien.

Iszkowski, R. (1886): Beitrag zur Ermittlung der Niedrigst-, Normal- und Höchstwassermenge auf Grund charakteristischer Merkmale der Flussgebiete. In: Zeitschrift des Österreichischen Architektur- und Ingenieurvereins: 69–98, Wien.

Kaller, J., Riebe, W. (1979): Vertrauensbereiche in hydrologischen Häufigkeitsanalysen. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 23. Jahrgang, Heft 4:86–90, Koblenz.

Kan, C. (1995): Die höchsten in der Schweiz beobachteten Abflussmengen bis 1990. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Bern.

Kölla, E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Mitteilungen der VAW Nr. 87, Zürich.

Kreps, H. (1952): Die näherungsweise Ermittlung grosser Hochwasserabflussspenden im Lichte neuerer Betrachtungen. In: Wasser- und Energiewirtschaft: 55–57, Baden.

Kürsteiner, L. (1917): Das neue Elektrizitätswerk der Stadt Chur. In: Schweizerische Bauzeitung 1:4–8, Zürich.

Lang, H. (1992): Hydrologie von der Anwendung zur Grundlagenforschung: Rückschau und Perspektive. In: Wasser – Energie – Luft 84. Jahrgang, Heft 11/12:354–357, Baden.

Lauterburg, R. (1887): Anleitung zur Berechnung der (mitteleuropäischen) Quellen- und Stromabflussmengen aus der Regenmenge, Grösse und Beschaffenheit der Quellen- und Flussgebiete. In: Allg. Bauzeitung: 9–13, 17–20, 27–30; Wien.

Loat, R., Willi., H. P. (1995): Hochwasserschutz aus der Sicht des Bundesamtes für Wasserwirtschaft. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 2:63–67, Baden.

Manser, S. (1996): Analyse verschiedener regionalhydrologischer Modelle zur Hochwasserabschätzung in Gebieten ohne Direktmessungen. Diplomarbeit in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern, Bern.

Melli, E. (1924): Die Dimensionierung städtischer Kanäle. In: Schweizerische Bauzeitung 12:137–141, Zürich.

Naef, F. (1983): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. 1. Zwischenbericht zum NF-Projekt «Abschätzung der Abflüsse in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung», Zürich.

Spreafico, M., Stadler, K. (1986): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie Nr. 7 und 8, Bern.

Spreafico, M., Aschwanden, H. (1991): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie Nr. 16 und 17, Bern.

Sydler, P., Widmoser, P., Zollinger, F. (1982): Statistische Untersuchungen von Extremabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Institut für Kulturtechnik der ETH, Zürich.

Weingartner, R. (1996): Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendungen. Unveröffentlichtes Manuskript. Geographisches Institut der Universität Bern, Bern.

Weingartner, R., Spreafico, M. (1990): Analyse und Abschätzung von Hochwasserabflüssen – Eine Übersicht über neuere schweizerische Arbeiten. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 34. Jahrgang, Heft 1/2:42–45, Koblenz.

Adresse der Verfasser: Dr. *Rolf Weingartner, Stefan Manser,* Geographisches Institut der Universität Bern, Gruppe für Hydrologie, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern.