

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 98 (2006)
Heft: 3

Artikel: Hochwasserfrachten in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten
Autor: Federer, Guido / Weingartner, Rolf
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939355>

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: 10.02.2026

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

Hochwasserfrachten in ausgewählten schweizerischen Einzugsgebieten

Guido Federer, Rolf Weingartner

Zusammenfassung

Kenntnisse zum bei einem Hochwasserereignis ablaufenden Wasservolumen (Fracht) sind für verschiedene Fragestellungen der Praxis von grosser Bedeutung. Im Gegensatz zu den Spitzenabflüssen ist die Bereitstellung der entsprechenden Daten aus Abflussmessreihen sehr aufwändig, da es schwierig ist, objektive Indikatoren zur Identifikation der Ereignisse mit den grössten Abflussvolumina zu finden. Im Rahmen einer Untersuchung am Geographischen Institut der Universität Bern wurden die jährlich höchsten Direktabflussfrachten der Periode 1979–2001 von fünfzehn Einzugsgebieten bestimmt und analysiert. Basierend auf diesen Ergebnissen konnten seltene Hochwasserfrachten extremwertstatistisch ermittelt und ein einfaches multivariates Regressionsmodell zur Abschätzung von Direktabflussfrachten in Gebieten ohne Direktmessungen entwickelt werden.

das Volumen des während eines Hochwasserereignisses ablaufenden Wassers, die Fracht, bekannt sein. Die Bedeutung der Kenntnisse der Hochwasserfracht ist vielfältig. So weist Rickenmann (1997) auf den Zusammenhang zwischen verfrachteter Schwemmh Holzmenge (H [m^3]) und Wasserfracht V_w [m^3] hin:

$$H = 4 \cdot V_w^{\frac{2}{5}}$$

Dieser Aspekt hat mit den Augusthochwassern 2005 eine neue Aktualität erhalten (Köchli und Waldner, 2005).

Im Bereich der Hochwasserfrachten wurde bisher noch relativ wenig gearbeitet. In den «Hochwasserbänden» der Landeshydrologie (LHG, 1986, 1988, 1991) wurden immerhin die Hochwasserganglinien und -frachten der grössten beobachteten Ereignisse ausgewiesen. Die Zahl statistischer Modelle zur Abschätzung der Frachten ist klein; zudem wurden diese Modelle für spezielle Zwecke entwickelt und erlauben daher keine direkte Abschätzung der grössten Frachten. Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Modell soll einen Beitrag dazu leisten, diese Lücke zu schliessen. Angestrebt wurde die Entwicklung eines einfachen Modells zur Abschätzung 100-jährlicher Direktabfluss-

1. Einleitung / Problemstellung

Die oftmals verheerenden Folgen seltener Hochwasser führen uns vor Augen, welche elementaren Naturgewalten bei solchen Ereignissen freigesetzt werden. Allein das ausserordentliche Hochwasserereignis vom August 2005 verursachte in der Schweiz Schäden in der Höhe von CHF 2,5 Mia. (BWG, 2005) und dies, obwohl im 20. Jahrhundert enorme Summen in den Hochwasserschutz investiert worden sind. Einerseits konnte das Risiko von Überschwemmungen durch diese Investitionen gesenkt werden. Andererseits liess die verstärkte Besiedlung der «sicher gewordenen» Flusstäler und sonstiger hochwassergefährdeter Räume das Schadenpotenzial ansteigen, sodass heutzutage bei sehr grossen Ereignissen Schäden in nie dagewesenem Ausmass entstehen (vgl. Weingartner, 1999).

Schutzmassnahmen gegen die Hochwassergefährdung zielen in zwei Richtungen (BWG, 2001): An erster Stelle stehen passive, raumplanerische Massnahmen, an zweiter Stelle aktive wasserbauliche Massnahmen, zu welchen Gerinneausbau und Gerinnekorrekturen, Hochwasserrückhalt und Hochwasserentlastungen gehören. In kleineren Einzugsgebieten erweisen sich Hochwasser-Rückhaltebecken oftmals als günstigste Lösung, sowohl was die Kosten betrifft als auch bezüglich der Eingriffe in Orts- und Landschaftsbilder. Rückhaltebecken wirken zudem als einzige aktive wasserbauliche Massnahme einer möglichen anthropogen verursachten Abflussverschärfung entgegen (Willi und Peter 1986).

Zur Planung von Hochwasserschutzmassnahmen sind Kenntnisse der Hochwasserverhältnisse eine notwendige Voraussetzung. So erfolgt der Ausbau der Gerinne auf eine bestimmte Spitzenabflussmenge, die in den meisten Fällen abgeschätzt werden muss. Mit dem Programmpaket «HQx_meso_CH» steht dazu ein praxistaugliches Instrument zur Verfügung (Barben et al., 2003), welches es erlaubt, Spitzenabflüsse beliebiger – insbesondere auch ungemessener – Einzugsgebiete auf der Grundlage verschiedener regionalhydrologischer Ansätze abzuschätzen (z.B. nach Kölla, 1987). Zur Dimensionierung von Rückhaltebecken und Retentionsräumen muss zusätzlich auch

	Gewässer – Station	Regimetyp (nach Aschwanden und Weingartner, 1985)	Einzugsgebietsfläche [km^2]	Mittlere Höhe [m ü. M.]	Vergleichen [%]
alpin	Rosegbach – Pontresina	a-glaciaire	66.5	2716	30.1
	Alpbach – Erstfeld, Bodenberg	b-glaciaire	20.6	2200	27.7
	Hinterrhein – Hinterrhein	a-glacio-nival	53.7	2360	17.2
	Dischmabach – Davos, Kriegmatte	b-glacio-nival	43.3	2372	2.1
	Chamuerabach – La Punt, Chamues-ch	nivo-glaciaire	73.3	2549	1.5
	Grosstalbach – Isenthal	nival alpin	43.9	1820	9.3
mittelländisch/jurassisch	Sitter – Appenzell	nival de transition	74.2	1252	0.1
	Urnäsch – Hundwil, Aeschentobel	nivo-pluvial préalpin	64.5	1085	0.0
	Gürbe – Belp, Mülimatte	pluvial supérieur	117.0	837	0.0
	Murg – Wängi	pluvial inférieur	78.0	650	0.0
	Mentue – Yvonand, La Mauguettaz	nivo-pluvial jurassien	105.0	679	0.0
	Areuse – St. Sulpice	pluvial jurassien	127.0	1081	0.0
südalpin	Riale di Calneggia – Caveragno, Pontit	nival méridional	24.0	1996	0.0
	Verzasca – Corippo	nivo-pluvial méridional	186.0	1672	0.0
	Cassarate – Pregassona	pluvio-nival méridional	73.9	990	0.0
	Faloppia – Chiasso	pluvial méridional	27.3	340	0.0

Tabelle 1. Untersuchte Einzugsgebiete.

frachten mittels varianter Ereignisparameter und invarianter Gebietskenngrößen.

2. Untersuchungsgebiete

Um als Grundlage für die Modellentwicklung ein räumlich breit abgestütztes Bild der grössten in der Schweiz auftretenden Frachten zu erhalten, wurde für jeden Abflussregimetyp der Schweiz (Aschwanden und Weingartner, 1985) ein Einzugsgebiet in die Untersuchung einbezogen. Die Einzugsgebiete wurden nach den Kriterien «Grösse» (20–250 km²), «naturnahe Bedingungen» sowie «Länge der Datenreihen von Abfluss und Niederschlag» ausgewählt (Tabelle 1).

3. Methode

3.1 Herkunft und Bearbeitung der Daten

Die Abflussdaten wurden vom Bundesamt für Umwelt zur Verfügung gestellt; die Niederschlagsdaten stammen aus den Messnetzen der MeteoSchweiz. Die auf Stundenwerte umgerechneten Niederschläge der massgeblichen Stationen wurden mittels der Inverse-Distance-Methode auf den Schwerpunkt der Untersuchungsgebiete interpoliert. Dieser punktuelle «Schwerpunktniederschlag» wird als Repräsentant des Gebietsniederschlags angesehen. Die für die zeitliche Umrechnung (1 Tag → 1 Stunde) notwendigen hochaufgelösten Niederschlagsdaten stehen erst ab 1978 zur Verfügung, wodurch die Niederschlagsdaten zum begrenzenden Faktor für die Länge der Untersuchungsperiode wurden. Letztere umfasst der Zeitraum 1979–2001, also 23 Jahre. Bei der Verzasca konnten auf Grund der kurzen Abflussmessreihe nur 12 Jahre analysiert werden. Die Daten zu den Einzugsgebietskenngrößen sowie die Methode zu deren Bestimmung stammen zum grössten Teil aus Aschwanden (1996).

3.2 Identifikation und Bestimmung der Niederschlags-Abfluss-Ereignisse

Für die extremwertstatistischen Analysen wurden jährliche Serien verwendet. Im Gegensatz zum jährlichen Spitzenabfluss kann die grösste jährliche Direktabflussfracht nicht direkt aus der Abflussganglinie abgelesen werden. In einem ersten Schritt mussten daher Indikatoren zur Bestimmung der grössten jährlichen Direktabflussfracht hergeleitet werden. Ausgangspunkte waren das Datum des Auftretens des maximalen jährlichen Spitzenabflusses sowie die Kalendertage des Auf-

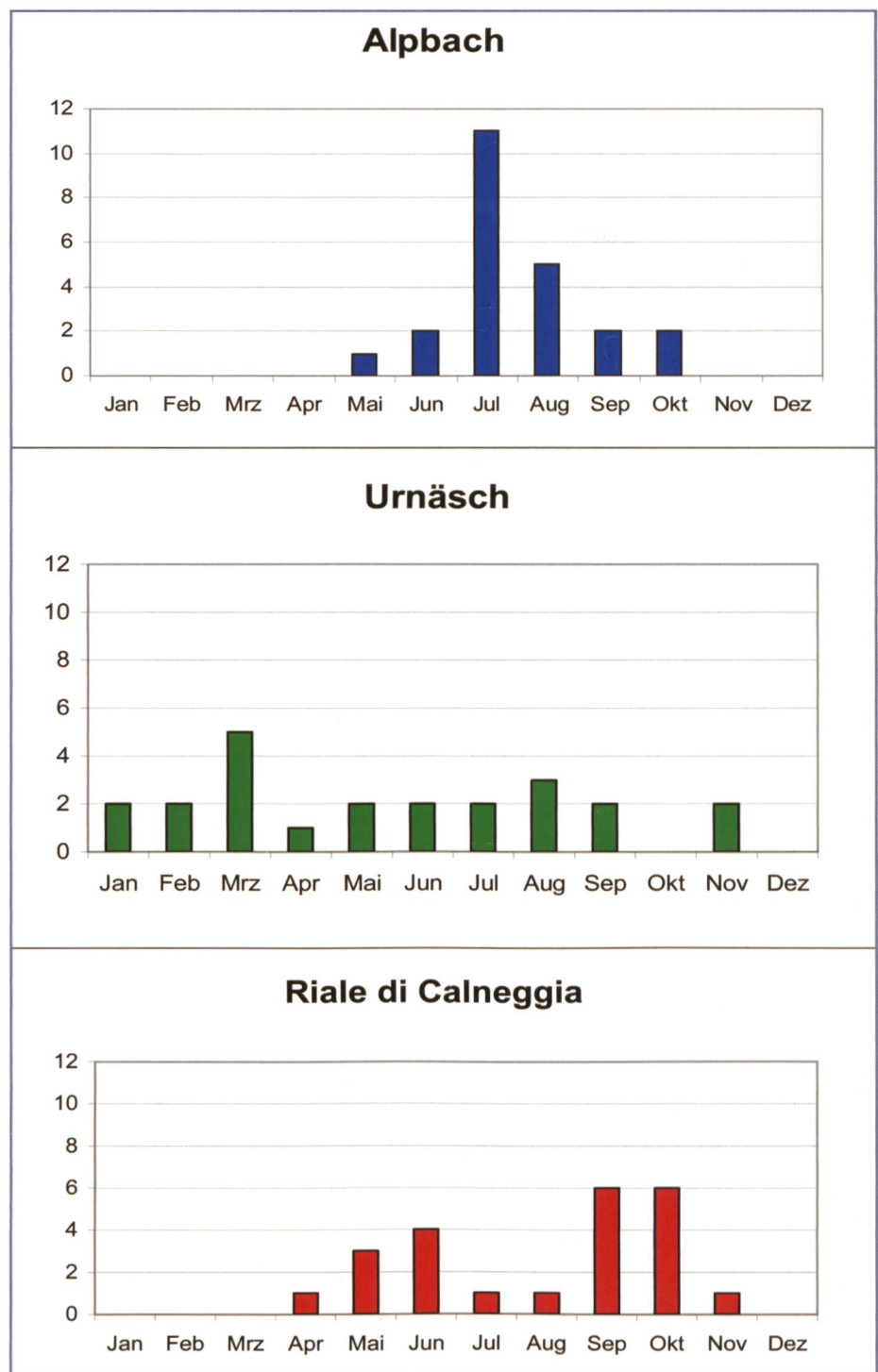


Bild 1. Monatliche Häufigkeit des Auftretens der grössten jährlichen Direktabflussfrachten in ausgewählten Einzugsgebieten: Alpbach (glaziales Regime), Urnäsch (nivo-pluviales Regime), Riale di Calneggia (nivales südalpines Regime).

tretens der grössten jährlichen 1-, 2- und 3-Tages-Mittel. Für die an diesen Terminen auftretenden Hochwasserereignisse wurden in der Folge die Direktabflussvolumina bestimmt. Zusätzlich wurden die Direktabflussvolumina von weiteren, subjektiv ausgewählten Ereignissen berechnet. Aus den jeweils grössten Ereignissen eines Jahres wurde die jährliche Serie zusammengestellt. Die Auswertung zeigt, dass mit den gewählten objektiven Indikatoren je nach Einzugsgebiet nur in etwa einem Drittel der Jahre die gewünschten Ereignisse – also

jene mit den grössten Direktabflussvolumina – gefunden werden konnten. Die grössten Gesamtabflüsse treten also nicht unbedingt zeitgleich mit den grössten Spitzenabflüssen auf. In alpinen Einzugsgebieten mit einem grossen Anteil schneebedeckter oder vergletschter Flächen sind die grössten Gesamtabflüsse häufig in Zusammenhang mit der Schnee- und Gletscherschmelze zu finden, wobei das eigentliche Schmelzwasser dem Basisabfluss zugerechnet wird. Fazit der Ereignisbestimmung: Es ist sehr schwierig, Indika-

toren zur Bestimmung des Ereignisses mit dem grössten jährlichen Direktabflussvolumen zu finden, was Untersuchungen zu den Direktabflussvolumina auch in Zukunft sehr aufwändig macht, da die Bestimmung der relevanten Ereignisse nicht automatisiert werden kann.

Die eigentliche Berechnung der Direktabflussvolumina sowie weiterer Ereignis- und Niederschlagsparameter der ausgewählten Ereignisse wurde im Programmpaket «Codeau» (Consuegra et al., 1994) durchgeführt. Um das Direktabflussvolumen eines Hochwasserereignisses zu erhalten, muss der Basisabfluss abgetrennt werden. Dies erfolgte in Anlehnung an frühere Untersuchungen (LHG, 1986, 1988, 1991) mit der graphischen Methode von Barnes (1939), die von der Annahme ausgeht, dass sich jede Abflusskomponente (Direktabfluss, Zwischenabfluss, Basisabfluss) wie ein einfach linearer Speicher verhält, dessen Auslaufcharakteristik einer Exponentialfunktion folgt und sich im halblogarithmischen Abflussdiagramm als Gerade abbildet.

3.3 Datenprüfung und Extrapolation

Bei der statistischen Analyse der Hochwasserfrachten wurde nach dem Merkblatt zur Wasserwirtschaft Nr. 251 «Statistische Analysen von Hochwasserabflüssen» (DVWK, 1999) verfahren. Die Wahrscheinlichkeitsanalysen sowie die Extrapolation der Daten auf ein 100-jährliches Ereignis erfolgten mit dem Programm HQ-EX (Wasy, 1997). In HQ-EX kommen sieben verschiedene Verteilungsfunktionen (VF) und drei Parameterschätzverfahren (PV) zur Anwendung. Die ermittelten Bemessungsfrachten wurden mit derjenigen Kombination aus VF und PV berechnet, welche in den Anpassungstests (χ^2 -Test, Quantil-Korrelations-Test) die besten Werte aufweisen. Zusätzlich wurde die Anpassungsgüte der Verteilungsfunktion auch optisch beurteilt. Mit der Extrapolation einer 23-jährigen Zeitreihe auf eine 100-jährliche Fracht wurde der empfohlene Extrapolationsbereich (3 mal Periodenlänge, also $3 \cdot 23 \text{ Jahre} \approx 70 \text{ Jahre}$) zwar überschritten, dies scheint aber auf Grund der guten Anpassung der Verteilungsfunktionen vertretbar zu sein. In sechs von 15 Einzugsgebieten wies die gemischte Extremwertverteilung die besten Anpassungsmasse auf.

3.4 Multiple Regressionsanalyse

Das Ziel der Regressionsanalyse war die Abschätzung der 100-jährlichen Direktab-

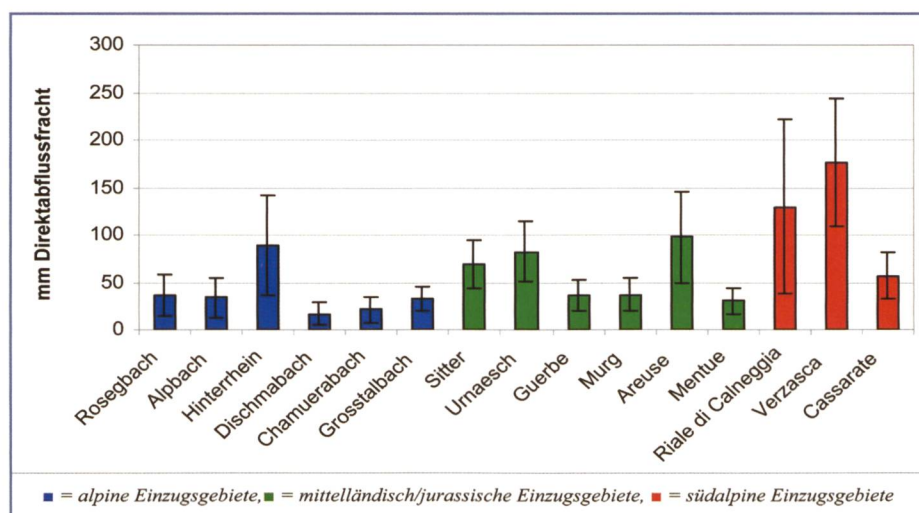


Bild 2. Gemittelte grösste jährliche Direktabflussfrachten und deren Standardabweichungen [mm] der untersuchten Einzugsgebiete.

flussfrachten mit Hilfe von Ereignis- und Einzugsgebietsparametern. Die Identifikation der unabhängigen Variablen wurde mittels einer Faktorenanalyse erreicht. Die Beurteilung der Güte des Regressionsmodells erfolgte mit dem korrigierten Bestimmtheitsmass r^2_{kor} , das im Gegensatz zum normalen Bestimmtheitsmass (r^2) die Beziehungen zwischen dem Erklärungsgehalt (multipler Korrelationskoeffizient) und der Anzahl der Variablen mitberücksichtigt. r^2_{kor} kann bei der Aufnahme weiterer Variablen auch kleiner werden. Das Gesamtmodell wurde mittels F-Test und die einzelnen Regressionskoeffizienten mittels t-Test auf ihre Signifikanz ($\alpha = 0,05$) geprüft. Ebenso wurde untersucht, ob die Prämissen für die Modellanwendung wie Linearität, Multikollinearität, Autokorrelation in den Residuen erfüllt sind.

4. Ergebnisse der Analysen

4.1 Direktabflussfrachten

Die saisonale Verteilung der grössten jährlichen Direktabflussfrachten weist je nach Regimetyp grosse Unterschiede auf (Bild 1). In alpinen Einzugsgebieten (Bsp. Albach) treten die grössten jährlichen Direktabflussfrachten fast ausnahmslos zwischen Mai bis Oktober auf. Der Anteil des Direktabflusses am Gesamtabfluss ist hier mit etwa 40–60% eher klein, weil der Basisabfluss wegen der Schnee- und Eismelze relativ hoch ist und der Niederschlag auch im Sommer teilweise in Form von Schnee zwischengespeichert wird. Dies muss berücksichtigt werden, wenn von der Direktabflusshöhe auf die Gesamtabflussfracht geschlossen werden soll.

Die untersuchten mittelländischen Einzugsgebiete (Bsp. Urnäsch) weisen eine mehr oder weniger gleichmässige

Verteilung der grössten jährlichen Direktabflussfrachten über das Jahr auf. In den zu den jurassischen Abflussregimetypen gehörenden Einzugsgebieten Mentue und Areuse werden die grossen Direktabflussfrachten vorwiegend im Winter beobachtet. Die südalpinen Einzugsgebiete zeigen kein einheitliches Muster. Die Häufigkeitsverteilung des nival-mérionalen Riale di Calneggia gleicht derjenigen eines alpinen Einzugsgebietes, aber auch die für die zwei tiefergelegenen Einzugsgebiete Verzasca und Cassarate typischen Schwerpunkte im April–Juni sowie im September–November sind erkennbar. Diese Verteilung spiegelt das Niederschlagsregime auf der Alpensüdseite wider (Schwarb et al., 2001). Der Anteil des Direktabflusses am Gesamtabfluss bewegt sich in den mittelländisch/jurassischen sowie den südalpinen Einzugsgebieten zwischen 60 und 75%. Das Verhältnis von Direkt- zu Basisabfluss kann jedoch beim Einzelereignis stark von den genannten Werten abweichen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die möglichen Auftretenszeitpunkte der grössten jährlichen Direktabflussfrachten in den alpinen sowie den südalpinen Einzugsgebieten relativ gut abschätzen lassen. In den mittelländisch/jurassischen ist dies indes kaum möglich.

Die absolute Höhe der gemittelten grössten jährlichen Direktabflussfrachten variiert je nach Einzugsgebiet sehr stark (Bild 2). Die kleinsten Frachten weisen die alpinen Einzugsgebiete auf, da hier die Niederschläge als Schnee zwischengespeichert werden – im Winter umfassend, im Sommer weniger ausgeprägt. Eine Ausnahme bildet der Hinterrhein, was jedoch mit den in diesem Gebiet beobachteten grossen Niederschlagsmengen und inten-

sitäten erklärt werden kann, welche auch für die hohen Direktabflussfrachten in den südalpinen Einzugsgebieten verantwortlich sind (Geiger et al., 1992). Die mittelländischen und jurassischen Einzugsgebiete nehmen eine Zwischenstellung ein.

Im Weiteren wurde der statistische Zusammenhang zwischen den grössten jährlichen Direktabflussfrachten und den dazugehörigen Niederschlagsparametern untersucht. Die Korrelationen sind sowohl für die Dauer, die Menge wie auch für die mittlere Intensität des Niederschlages je nach Einzugsgebiet unterschiedlich ausgeprägt, wobei die Niederschlagsmenge die höchsten Korrelationskoeffizienten aufweist. Über alle Jahre und Einzugsgebiete ist der Korrelationskoeffizient $r = 0,740$ ($n = 334$) für die Beziehung Niederschlagsmenge – Direktabflussfracht zwar signifikant, trotzdem lassen sich nur 55% der Varianz der grössten jährlichen Direktabflussfrachten durch die Niederschlagsmenge erklären. Daraus folgt, dass sich der Niederschlag sicherlich nicht als alleiniges Kriterium für die Abschätzung der Direktabflussfrachten eignet.

5. Ein einfaches Modell zur Abschätzung der Frachten

Für die Modellierung der Direktabflussfrachten mittels invarianter Einzugsgebietskenngrössen werden die x-jährlichen Direktabflussfrachten der Untersuchungsgebiete zur Modellkalibration benötigt. Diese sind in *Tabelle 2* dargestellt.

5.1 Identifikation linear unabhängiger Einzugsgebietskenngrössen

Da auf Grund der Erkenntnisse in Kapitel 4 eine Abschätzung der grössten jährlichen Direktabflussfrachten mit den verfügbaren Ereignisparametern nicht zufriedenstellend möglich ist, wurde versucht, die Frachten mittels invarianter Einzugsgebietskenngrössen über ein multiples Regressionsmodell zu schätzen. Zu diesem Zweck standen dreissig Einzugsgebietsparameter zur Verfügung. Als abhängige Variable wurden die 100-jährlichen Direktabflussfrachten (siehe *Tabelle 2*) verwendet. Bei der Betrachtung der Korrelationen zwischen den Einzugsgebietsparametern fällt auf, dass die Höhenparameter (mittlere, minimale und maximale Einzugsgebietshöhe) sowohl mit den morphometrischen als auch mit den Landnutzungsparametern stark korrelieren. Mittels einer Faktorenanalyse wurden deshalb linear möglichst unabhängige Einzugsgebietsparameter ermittelt: Seeanteil [%], Anteil

Fließgewässer, Ufer- und Nassstandorte [%], Streckungsindex [-], Formfaktor [%] und Flusssdichte [%]. Bei diesen Ergebnissen besteht eine gute Übereinstimmung mit den Resultaten von Weingartner (1999), der solche Korrelations- und Faktoranalysen auf der Grundlage der Gebietskenngrössen der 1050 Basisgebiete der Schweiz (Breinlinger et al., 1992) durchgeführt hat.

5.2 Modellentwicklung

Für die eigentliche Modellentwicklung wurde diejenige Kombination von invarianten Einzugsgebietskenngrössen gesucht, welche mit möglichst wenigen Variablen einen möglichst grossen Anteil der Varianz der extrapolierten 100-jährlichen Direktabflussfrachten erklärt. Das vorgeschlagene Modell wurde mit einer schrittweisen Variablenauswahl gefunden:

$$\text{Dir}_{100} = -158,091 + 174,452 \cdot \text{Flie} + 279,716 \cdot \text{Fd} + 112,134 \cdot \text{See}$$

mit: Dir_{100} 100-jährliche Direktabflussfracht [mm]

Flie Anteil Fließgewässer, Ufer- und Nassstandorte [%]

Fd Flusssdichte [km/km^2]

See Seeanteil [%]; (hier zwischen 0 und 1,4%)

Die statistischen Masszahlen für das Gesamtmodell sind in *Tabelle 4* zu finden. Das Gesamtmodell weist eine sehr hohe Signifikanz auf. Ebenfalls erfüllt das Modell die Forderung nach Unabhängigkeit der einzelnen Regressoren sowie die Bedingung, dass keine Autokorrelation zwischen den einzelnen unabhängigen

Variablen vorliegt. Zudem leisten alle drei Parameter einen signifikanten Beitrag zur Erklärung der 100-jährlichen Direktabflussfrachten. Den grössten Einfluss hat der Parameter «Anteil Fließgewässer, Ufer- und Nassstandorte [%]», gefolgt von der «Flusssdichte [km/km^2]» und dem «Seeanteil [%]». Die Prämissen für ein multiples, lineares Regressionsmodell sind erfüllt. Eine prozessorientierte Erklärung für die ins Modell eingeflossenen Variablen kann nur bedingt gegeben werden, da es sich um ein stochastisches Modell handelt. Immerhin scheint es plausibel, dass sich das Direktabflussvolumen erhöht, wenn

- die Flusssdichte zunimmt, also immer grössere Teile eines Einzugsgebietes direkt an die Fließgewässer angeschlossen sind und
- der Anteil der Nassstandorte zunimmt, die wegen ihres geringen Retentionsvermögens bei Niederschlagsereignissen sofort Direktabfluss erzeugen.

Etwas schwieriger ist die positive Korrelation zwischen Direktabfluss und Seeanteil zu begründen. Können wir folgern, dass bei den grössten Ereignissen das Rückhaltevermögen der Seen erschöpft ist und sie somit überproportional zum Abfluss beitragen?

Für die Bewertung der Modellgüte kann schliesslich der Vergleich der gemessenen und der modellierten Direktabflussfrachten beigezogen werden (*Bild 3*). Dabei handelt es sich allerdings um eine so genannte «in-sample»-Überprüfung. Das Schema für die Beurteilung der Abweichungen zwischen den beo-

Gewässer	Direktabflussfracht [mm]		
	25-jährliche	50-jährliche	100-jährliche
Rosegbach	82.9	95.1	107
Alpbach	77.5	88.9	99.9
Hinterrhein	212	246	281
Dischmabach	45	54.5	64
Chamuerabach	52.2	62.4	73.1
Grosstalbach	59	66.6	74.6
Sitter	125	142	160
Urnäsch	154	173	191
Gürbe	69.8	82.8	98.5
Murg	74.8	87.1	100
Mentue	57.7	70.2	86.7
Areuse	197	219	239
Riale di Calneggia	341	400	459
Verzasca	310	346	382
Cassarate	111	125	138

Tabelle 2. Extrapolierte 25-, 50- und 100-jährliche Direktabflussfrachten [mm] der untersuchten Einzugsgebiete.

r	r ²	r ² _{kor}	Standardfehler des Schätzers
0.963	0.928	0.907	37.62

Tabelle 3. Statistische Masszahlen des Gesamtmodelles mit den unabhängigen Variablen Seeanteil, Flussdichte und Anteil Fließgewässer, Ufer- und Nassstandorte.

bachten und modellierten Direktabflussfrachten wurde aus Barben et al. (2001) übernommen. Geringe Abweichungen (max. 25%) zeigen der Rosegbach, der Hinterrhein, der Chamuerabach, die Sitter, die Urnäsch, der Riale di Calneggia, die Verzasca sowie der Cassarate. Mittlere Unter- resp. Überschätzungen (25–50%) ergeben sich bei Alpbach, Dischmabach, Grosstalbach und Murg. Abweichungen von über 50% weisen die Gürbe, die Mentue und die Areuse auf. Die mangelhafte Modellgüte im jurassischen Einzugsgebiet Areuse dürfte wahrscheinlich auf dessen Lage im Karst zurückzuführen sein. Die im Modell vorkommenden Parameter «Fließgewässer, Ufer, Nassstandorte [%]» und «Flussdichte [km/km²]» berücksichtigen nur die oberirdischen Gewässer. Im Karst spielen unterirdische Fließwege eine entscheidende Rolle. Zudem ist die Einzugsgebietsfläche im Karst nur schwer bestimmbar, da die oberirdische Einzugsgebietsfläche oftmals nicht mit der effektiven Einzugsgebietsfläche übereinstimmt. Die Einzugsgebietsfläche geht aber rechnerisch in die Flussdichte ein und kann diese somit verfälschen.

Die Gürbe ist bekannt dafür, dass zwischen den Abflussmessstationen Burgistein und Belp, Mülimatt, bei einem grossen Hochwasser Überflutungen auftreten (Naef und Thoma, 2002). Dadurch wird die Ganglinie gedämpft. Dies wird im Regressionsmodell nicht berücksichtigt.

Es kann somit gefolgert werden, dass sich das Modell sicher weniger für Einzugsgebiete im Karst eignet sowie für solche, bei denen massgebliche Ausuferungen auftreten.

Da die extrapolierten 100-jährlichen Direktabflussfrachten auch mit der Niederschlagsmenge und -dauer korreliert sind, wurde versucht, das Modell mit Niederschlagsparametern zu verbessern. Deshalb wurde aus der Starkniederschlagsstatistik der extreme Niederschlag mit einer 24-stündigen Dauer und einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren gewählt (Daten aus Jensen et al., 1997). Die Integration dieses zusätzlichen Parameters brachte jedoch keine Verbesserung der Modellgüte ($r^2_{\text{kor}} = 0,906$, ohne Niederschlag 0,907). Deshalb ist es sinnvoller, das Modell mit der kleineren Anzahl von unabhängigen Parametern zu verwenden.

5.3 Versuch einer Bewertung zukünftiger Abschätzungen

Nach der Eichung des Modelles an den untersuchten Einzugsgebieten müsste der nächste Schritt sein, das Modell an anderen Einzugsgebieten, für welche ebenfalls Daten über die Direktabflussfrachten vorliegen, zu validieren. Angesichts des grossen Aufwandes für die Bestimmung der Direktabflussfrachten war dies jedoch nicht möglich.

Deshalb wurde ein anderer Ansatz gewählt, um wenigstens einige Hinweise auf die Qualität zukünftiger Abschätzungen in ungemessenen Einzugsgebieten zu erhalten. Dazu wurden je ein alpines (Hinterrhein) und ein mittelländisches Einzugsgebiet (Urnäsch) aus dem Kollektiv der untersuchten Einzugsgebiete ausgeschlossen. Für die restlichen 13 Einzugsgebiete wurde das Modell nochmals gerechnet (reduziertes Modell). Mit den so erhaltenen Koeffizienten wurden die Direktabflussfrachten für alle untersuchten Einzugsgebiete nochmals bestimmt. Als Ergebnis können wir festhalten, dass die Koeffizienten des ursprünglichen und des reduzierten Modells nur wenig voneinander abweichen. Diese erste Bewertung ersetzt jedoch keinesfalls eine umfassende Validierung des Modells mit Daten aus Einzugsgebieten, welche nicht in die Entwicklung des Modells eingeflossen sind.

5.4 Anwendung in der Praxis

Für die Anwendung des Modells werden die Einzugsgebietskenngrössen Fluss-

dichte, «Seeanteil» und «Anteil Fließgewässer, Ufer- und Nassstandorte» des zu untersuchenden Einzugsgebiets benötigt. Sofern das gewünschte Einzugsgebiet einem hydrologischen Untersuchungsgebiet der Schweiz entspricht, sind die Angaben in Aschwanden (1996) zu finden. Ansonsten sollten diese möglichst auf derselben Grundlage bestimmt werden:

- Für die Bestimmung der Flussdichte werden die Einzugsgebietsfläche und die kumulierte Flusslänge benötigt. Diese werden auf der Landeskarte 1:25 000 respektive mit dem digitalen Gewässernetz 1:200 000 erhoben.
- Der Seeanteil sowie der Anteil Fließgewässer, Ufer- und Nassstandorte wurden auf der Grundlage des digitalen Datensatzes «Schweizer Seen» (BFS, 1992a) 1:25 000 und der «Arealstatistik 1979/85» (BFS, 1992b) bestimmt.

Die Gültigkeit des Modelles beschränkt sich auf das Gebiet der Schweiz mit einer beschränkten Aussagekraft für das Wallis, da aus diesem Gebiet keine Daten in die Entwicklung des Modells eingeflossen sind. Für Einzugsgebiete im Karst liefert das Modell ebenfalls mangelhafte Resultate. Für die Entwicklung dieses Modells wurden Einzugsgebiete zwischen 20 und 186 km² Einzugsgebietsfläche verwendet. Die Gültigkeit des Modells beschränkt sich dementsprechend auf Einzugsgebiete dieser Grössenordnung.

6. Diskussion und Zusammenfassung

In einer Messreihe bereitet die Identifikation der Ereignisse mit den grössten jährlichen Direktabflussfrachten einige Probleme. Es wurde mit verschiedenen Indikatoren versucht, die grössten jährlichen Direktab-

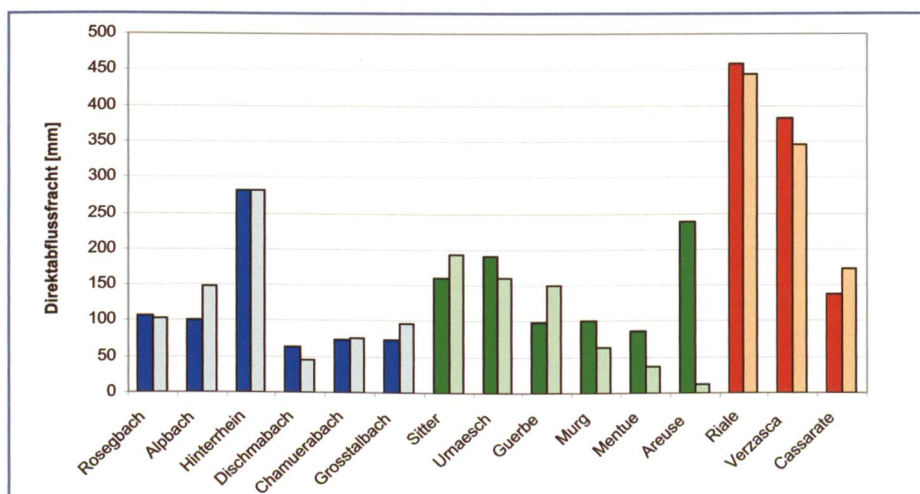


Bild 3. Gemessene und modellierte 100-jährliche Direktabflussfrachten [mm] der untersuchten Einzugsgebiete (Gesamtmodell). Die linke Säule entspricht jeweils der gemessenen, die rechte Säule der modellierten 100-jährlichen Direktabflussfracht [mm].

flussereignisse zu finden. Mit keinem der ausgewählten Indikatoren konnten alle relevanten Ereignisse identifiziert werden. Dies ist auf die grosse Variabilität der Form der Ereignisse zurückzuführen sowie darauf, dass nicht alle grössten Abflüsse (allein) durch Niederschläge verursacht werden. Somit bleiben Untersuchungen zu den Direktabflussfrachten wegen der notwendigen subjektiven Ereignisidentifikation und Volumenbestimmung auch in Zukunft aufwändig. Eine Alternative dazu könnte die Benützung der Gesamtabflussfrachten darstellen.

Für jedes Niederschlags-Abfluss-Ereignis wurde der zugehörige Niederschlag sowie dessen mittlere Intensität und Dauer bestimmt. Unter der Prämisse, dass der Abflussbeiwert nicht grösser als eins werden kann, erlaubt dies eine erste Abschätzung der maximal möglichen Direktabflussfrachten (Grenzwertüberlegungen).

Die Bestimmung der invarianten Einzugsgebietskenngrössen erfolgte je nach Parameter auf unterschiedlichen Grundlagen (z.B. digitales Geländemodell, Landeskarte 1:25 000). Dementsprechend ist auch die Genauigkeit und somit die Datenqualität unterschiedlich, sodass sich keine generellen Aussagen über die Datenqualität machen lassen. Bei Parametern, welche stark von der Generalisierung der Kartengrundlage beeinflusst werden (z.B. Flussdichte), ist es von grosser Bedeutung, für alle Auswertungen dieselbe Kartengrundlage zu verwenden.

Die Direktabflussfrachten zeigen zwischen den Abflussregimes sowohl Unterschiede in der Menge des Direktabflusses als auch in der saisonalen Verteilung der massgeblichen Ereignisse. Die möglichen Zeitpunkte des Auftretens der Ereignisse mit den grössten jährlichen Direktabflussfrachten lassen sich in den alpinen sowie den südalpinen Einzugsgebieten relativ gut abschätzen, für die mittelländisch/jurassischen Einzugsgebiete kann dazu kaum eine Aussage gemacht werden.

Die Resultate dieser Analysen zeigen, dass eine Abschätzung der 100-jährlichen Direktabflussfrachten weder mittels des Niederschlagsvolumens alleine, noch mit einzelnen Parametern der Ganglinie oder Kenngrössen des Einzugsgebietes befriedigend möglich ist. Dies widerspiegelt die Aussage von Schumann (2002): «Hochwasserereignisse sind [...] die komplexe Folge der Überlagerung sehr unterschiedlicher Faktoren. Eine stark vereinfachende Betrachtungsweise dieser

komplexen Prozesse durch monokausale Ursache-Wirkungs-Diskussionen wird der Hochwasserproblematik nicht gerecht.»

Auf Grund dieser Überlegungen wurde ein multiples Regressionsmodell entwickelt, um die 100-jährlichen Direktabflussfrachten mit Hilfe von Einzugsgebietskenngrössen zu modellieren. Mit den unabhängigen Variablen «Seeanteil», «Flussdichte» und «Anteil Fließgewässer, Ufer- und Nassstandorte» konnte ein $r^2_{\text{kor}} von 0,91 erreicht werden. Dieses Resultat ist hochsignifikant. Zudem erfüllt das Modell alle statistischen Voraussetzungen. Die Allgemeingültigkeit der Modellparameter wird allerdings durch den kleinen Stichprobenumfang, der zur Modellentwicklung zur Verfügung stand, relativiert.$

Literatur

- Consuegra, D., De Souza, P., Musy, A. (1994): CO-DEAU: A data base package for the assessment and analysis of hydrometeorological data. In: Verwey A. et al. (Eds.): Hydroinformatics 94, Proceedings.
- Aschwanden, H., Weingartner, R. (1985): Die Abflussregimes der Schweiz. Publikation Gewässerkunde Nr. 65, Bern.
- Aschwanden, H. (1996): Einzugsgebietskenngrössen der hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz. Hydrologische Mitteilungen, Nr. 23, Bern.
- Barben, M. et al. (2001): Länderbericht Schweiz. In: Barben, M. et al. (Hrsg.): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen. Erfahrungen aus den Rheinanaliegerstaaten. KHR-Bericht, Nr. 1-19, 11-73, Lelystad.
- Barben, M. et al. (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten – Praxishilfe. Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 4, Bern.
- Barnes, B.S. (1939): The structure of baseflow recession curves. Transactions of the American Geophysical Union 20: 721-725.
- BFS (Bundesamt für Statistik) (1992a): GEOSTAT – Benutzerhandbuch. Statistik der Schweiz. Ausgabe 12.94, Bern.
- BFS (Bundesamt für Statistik) (1992b): Arealstatistik 1979/85 – Kategorienkatalog. Die Bodennutzung der Schweiz, Bd. 2, Bern.
- Breinlinger, R., Gamma, P., Weingartner, R. (1992): Kenngrössen kleiner Einzugsgebiete. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 1.2, Bern.
- BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie) (2001): Hochwasserschutz an Fließgewässern. Wegleitung, Bern.
- BWG (Bundesamt für Wasser und Geologie) (2005): Bericht an den Bundesrat über die Hochwasserereignisse 2005, Bern.
- DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft. Heft 251, Bonn.
- Geiger, H., Röthlisberger, G., Stehli, A., Zeller, J.

(1992): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperiode 1901-1970. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.4, Bern.

Jensen, H., Lang, H., Rinderknecht, J. (1997): Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.4², Bern.

Köchli, D., Waldner, P. (2005): August-Hochwasser 2005: Schwemholz war überwiegend frisch. WSL Informationsblatt Forschungsbereich Wald Nr. 21, Birmensdorf.

Kölla, E. (1987): Abschätzung von Spitzenabflüssen in kleinen natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz: Schweizer Ingenieur und Architekt 33-34: 965-972, Zürich.

Landeshydrologie (1978-2001): Hydrologische Jahrbücher der Schweiz. Bern.

LHG (1986, 1988, 1991): Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilungen der Landeshydrologie und -geologie Nr. 7, 8, 16 und 17, Bern.

Naef, F., Thoma, C. (2002): Dämpfung von Hochwasserspitzen in Fließgewässern. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 5.9, Bern.

Rickenmann, D. (1997): Schwemholz und Hochwasser. In: Wasser Energie Luft, 89. Jahrgang, Heft 5/6: 115-119, Baden.

Schumann, A. (2002): Möglichkeiten und Grenzen des Hochwasserschutzes. Vortrag auf der ATV-DVWK Landesverbandstagung Sachsen/Thüringen am 5. Juni 2002. Thüringen.

Schwarb, M., Frei, Ch., Schär, Ch., Daly, Ch. (2001): Mittlere saisonale Niederschlagshöhen im europäischen Alpenraum 1971-1990. Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 2.7, Bern.

Wasy (1997): HQ-EX Version 2.0 – Benutzerhandbuch. WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, Berlin.

Weingartner, R. (1999): Regionalhydrologische Analysen – Grundlagen und Anwendung. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz, Nr. 37, Bern

Willi, H.P., Peter, W. (1986): Dimensionierung von Hochwasser-Rückhaltebecken am Beispiel des Wildbachs Wetzikon. Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bern (unveröffentlicht).

Anschrift der Verfasser

Lic. phil. nat. Guido Federer, Gruppe für Hydrologie am Geographischen Institut der Universität Bern, CH-3012 Bern

Prof. Dr. Rolf Weingartner, Gruppe für Hydrologie am Geographischen Institut der Universität Bern CH-3012 Bern

wein@giub.unibe.ch