

Zeitschrift: Bulletin für angewandte Geologie
Herausgeber: Schweizerische Vereinigung der Petroleum-Geologen und –Ingenieure;
Schweizerische Fachgruppe für Ingenieur-Geologie
Band: 6 (2001)
Heft: 1

Artikel: Hochwasser und Feststofftransport in Wildbacheinzugsgebieten
Autor: Hegg, Christoph / Rickenmann, Dieter / Forster, Felix
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-222969>

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: 06.07.2025

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

Hochwasser und Feststofftransport in Wildbacheinzugsgebieten

mit 4 Figuren

CHRISTOPH HEGG *, DIETER RICKENMANN* & FELIX FORSTER*

Zusammenfassung

Wildbäche verursachen in der Schweiz jedes Jahr erhebliche Schäden. Die Beurteilung der von ihnen ausgehenden Gefahren bildet deshalb einen wichtigen Bestandteil eines integralen Risikomanagements. Die Besonderheit der von Wildbächen ausgehenden Gefahr liegt in den grosse Feststoffmengen, die durch Murgänge oder Geschiebetransport verlagert werden, welche für den Menschen eine grosse Bedrohung darstellen. Weiter sind sie durch sehr rasche Wechsel in ihrer Abflussführung charakterisiert. Verschiedene, im zweiten Teil dieses Beitrags erläuterte Verfahren erlauben es heute erfahrenen Bearbeitern und Mitarbeiterinnen die Wildbachgefahren grob abzuschätzen.

1. Einleitung

Die DIN-Norm 19663 (1985) definiert Wildbäche als «oberirdische Gewässer mit zumindest streckenweise grossem Gefälle, rasch und stark wechselndem Abfluss und zeitweise hoher Feststoffführung. Art und Umfang der Feststoffherde sind zusammen mit der Abflusscharakteristik entscheidend für ihre wildbachkundliche Beurteilung.»

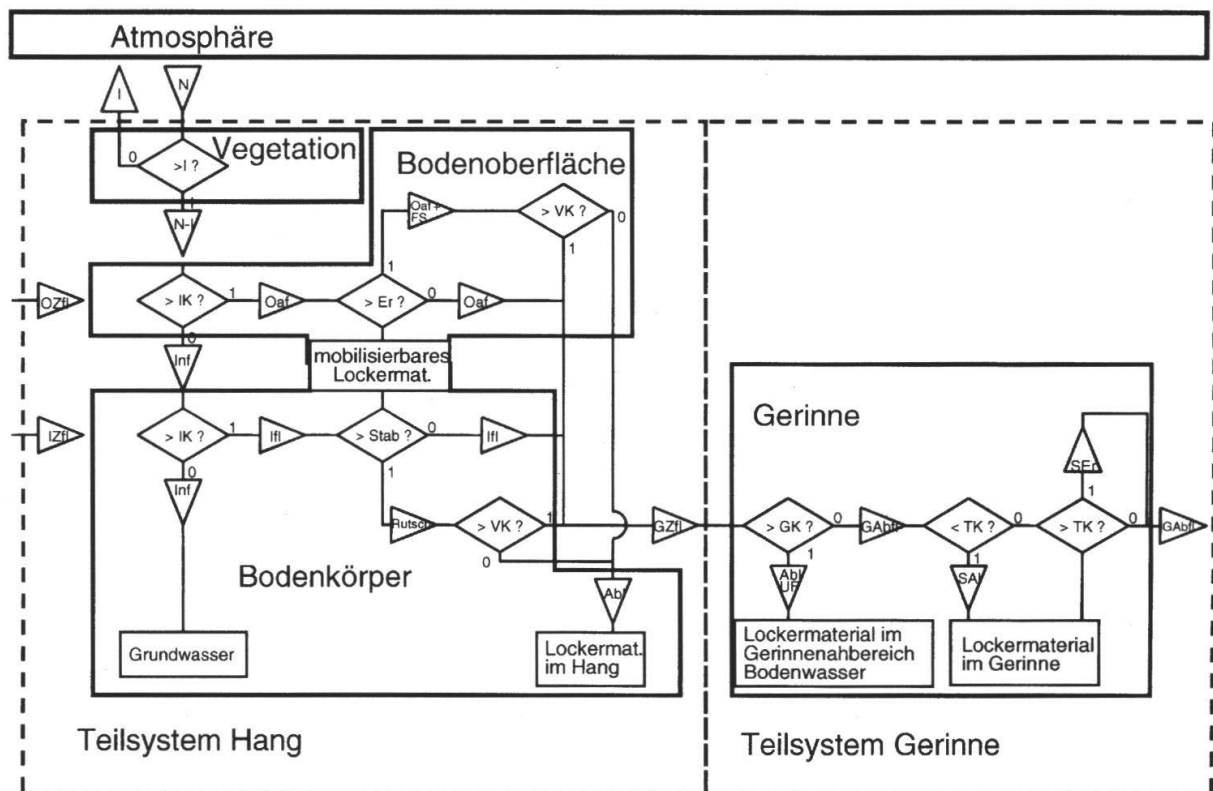
Wildbäche stellen einen prägenden Bestandteil grosser Teile der schweizerischen Landschaft dar. Ihre Schwemmkegel bilden vor allem im Alpenraum aber oft auch im Mittelland einen bevorzugten Siedlungsstandort. Der Grund dafür liegt darin, dass diese Kegel in der Regel die relativ sichersten Standorte sind. Während die Talebenen von den früher unverbauten Flüssen meist jährlich überflutet wurden, führen Wildbäche seltener Hochwasser und sind somit vergleichsweise sicher. Kommt es aber auch dort zu einem Hochwasser, fallen diese dafür oft um so heftiger aus.

Wildbäche verursachen einen erheblichen Teil der jährlichen Unwetterschäden in der Schweiz, die sich im Mittel der Periode 1972–1999 etwa auf 200 Mio. Schweizer Franken pro Jahr (nicht teuerungsbereinigt) belaufen. Ein Beispiel aus der jüngeren Vergangenheit sind die Ereignisse in Sachseln, wo am 15. August 1997 mehrere Bäche über die Ufer traten und Schäden in der Grössenordnung von 100 Mio.

* Eidg. Forschungsanstalt WSL, Forschungsbereich Naturgefahren, 8903 Birmensdorf

Schweizer Franken verursachten. Ein anderes Beispiel ist der Flybach in Weesen, wo an Pfingsten 1999 eine Rutschung im oberen Teil des Einzugsgebiets so grosse Feststoffmengen auf dem Kegel erwarten liess, dass die Evakuierung von ca. 100 Gebäuden angeordnet werden musste. Auch beim Ereignis vom 15. Oktober 2000 im Wallis waren Wildbäche die Verursacher für einen erheblichen Teil der Schäden (vgl. Hegg et al. 2001).

Wildbäche führen meist im Zusammenhang mit Starkniederschlägen Hochwasser. Im Hochgebirge können allenfalls auch Ausbrüche von Gletscherseen zu aussergewöhnlichen Wasserständen führen. Doch wie schon die oben zitierte DIN Norm andeutet, sind es nicht nur die besonders rasch und stark anschwellenden Hochwasser, die den Charakter eines Wildbaches bestimmen. Eine wesentliche Rolle



Flüsse		Regler	
N	Niederschlag	I	Interzeption
I	Interzeption	IK	Infiltrationskapazität
N-I	Niederschlag - Interzeption	Er	Erodierbarkeit
Inf	Infiltration	Stab	Stabilität des Lockermaterials
Oaf	Oberflächenabfluss	VK	Verlagerungskap. im Hang (Hangneigung, Rauhigkeit)
Ifl	Interflow	GK	Gerinnekapazität (Durchflusskapazität)
Oaf+FS	Oberflächenabfluss mit Feststoff	TK	Transportkapazität im Gerinne
Rutsch	(Erosion durch Spülung) Rutschungsprozesse		
Abl	Ablagerung		
Gzfl	Gerinnezufluss aus der Fläche		
Abl UF	Ablagerung und Überflutung		
Gabfl	Abfluss im Gerinne		
SEr	Sohlenerosion		
SAI	Ablagerung im Gerinne (Auflandung)		

Fig. 1: Prozess-System Wildbach (Hegg 1997).

spielen dabei Feststoffe, welche das abfließende Wasser bei den oft beträchtlichen Neigungen in grossen Mengen mitzutransportieren vermag.

Der nachfolgende Beitrag befasst sich deshalb sowohl mit der Entstehung eines Hochwassers als auch mit dem Transport von Feststoffen. Dabei werden im ersten Teil die beteiligten Prozesse kurz erläutert und im zweiten Teil die Methoden dargestellt, mit welchen Abflüsse und Feststofffrachten in Wildbächen abgeschätzt werden können. Die ganze Betrachtung wird dabei vor allem unter dem Aspekt der Beurteilung der Gefährlichkeit von Wildbächen durchgeführt. Im Zentrum stehen somit schwergewichtig die seltenen grossen Hochwasser, da Wildbäche insbesondere dann grosse Auswirkungen auf ihre Umwelt und allfällige Bauten haben können.

2. Prozesse des Wasser- und Feststoffhaushalts in Wildbächen

2.1 Grundsätze zur Gliederung von Prozessen

Grundsätzlich gibt es zahlreiche Möglichkeiten die in einem Wildbacheinzugsgebiet ablaufenden Prozesse zu gliedern und zu strukturieren. In der Regel wird dabei in erster Linie zwischen Prozessen des Wasserhaushalts und jenen des Feststoffhaushalts unterschieden. Grundlage für die Gliederung der Prozesse bildet auch das in Figur 1 dargestellte Prozess-System Wildbach, das aus den fünf Elementen Atmosphäre, Vegetation, Bodenoberfläche, Bodenkörper und Gerinne besteht. Diese fünf Elemente sind zu zwei Teilsystemen zusammengefasst, welche eine räumliche Trennung in ein System mit eher flächigen Prozessen im Hang (Teilsystem Hang) und in ein System mit eher linearen Prozessen entlang von Gerinnen (Teilsystem Gerinne) erlaubt. Die einzelnen Teilsysteme sind durch Wasser- und Feststoffflüsse miteinander verbunden. Ein ganzes Wildbacheinzugsgebiet kann durch die Kombination von verschiedenen Hang- und Gerinneteilsystemen abgebildet werden, wie dies z.B. Figur 2 zeigt. Die einzelnen Teilsysteme sind durch Wasser- und Feststoffflüsse miteinander verbunden.

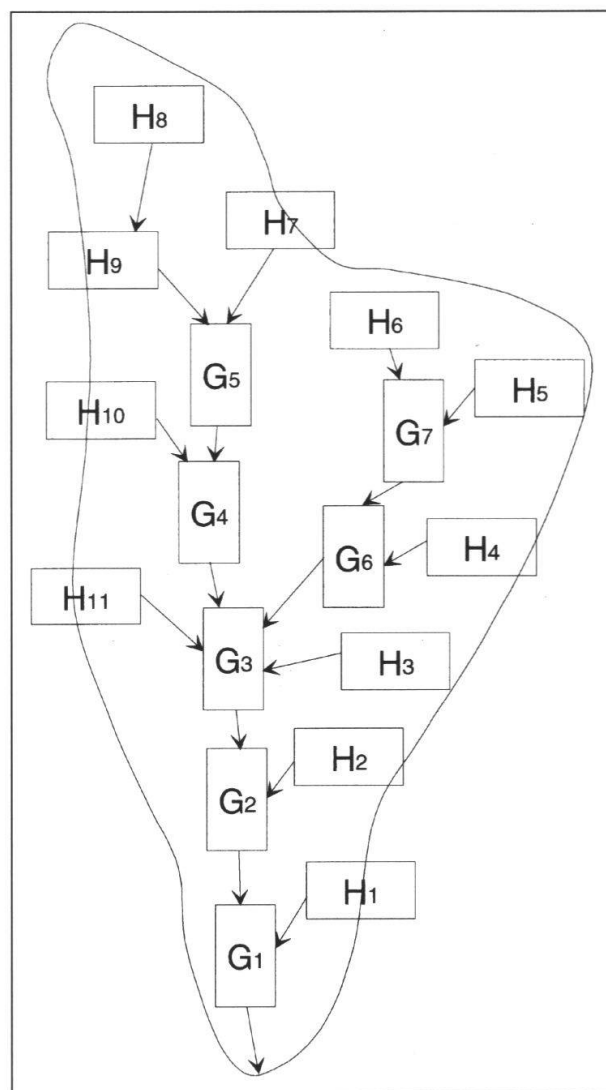


Fig. 2: Räumliche Struktur des Gesamtmodells Wildbach. Das Modell besteht aus Hang- (H_x) und Gerinnesystemen (G_y), die durch Materieflüsse miteinander verbunden sind (Hegg 1997).

2.2 Prozesse des Wasserhaushalts

Beim Wasserhaushalt eines Einzugsgebiets kann in einer ersten groben Gliederung zwischen den Prozessen der Abflussbildung im Hang und jenen der Abflussfortpflanzung in einem Gerinne unterschieden werden. Im Zentrum stehen dabei diejenigen Prozesse, welche an der Umsetzung des Niederschlagsinputs in den Abfluss beteiligt sind.

Die Abflussbildung im Hang ist schematisch in Figur 3 dargestellt. Ein Teil des Niederschlags wird durch die Vegetation oder den ungesättigten Bodenspeicher zurückgehalten und verdunstet nach Ende des Regens wieder in die Atmosphäre, ohne zum Abfluss beizutragen (Evapo-Transpiration).

Bei der Abflussbildung im Hang eines Wildbacheinzugsgebiets geht es im Zusammenhang mit der Entstehung von Hochwasserereignissen vor allem darum zu bestimmen, welcher Anteil des Niederschlags rasch zum Abfluss gelangt. Je nach Bodeneigenschaften und Einzugsgebietsgrösse tragen dazu vor allem der Oberflächenabfluss und/oder der Zwischenabfluss bei. Der besonders rasche Oberflächenabfluss entsteht, wenn der Boden vollständig mit Wasser gesättigt ist, oder wenn mehr Niederschlag auf den Boden fällt, als infiltrieren kann.

Der Zwischenabfluss findet in der Regel innerhalb der wechselfeuchten Zone des Bodens statt. Diese Zone ist zumindest zeitweise nicht vollständig mit Wasser gesättigt und enthält zahlreiche Lebewesen wie z.B. Regenwürmer aber auch Wurzeln. Die Aktivität dieser Lebewesen und absterbende Wurzeln hinterlassen in die-

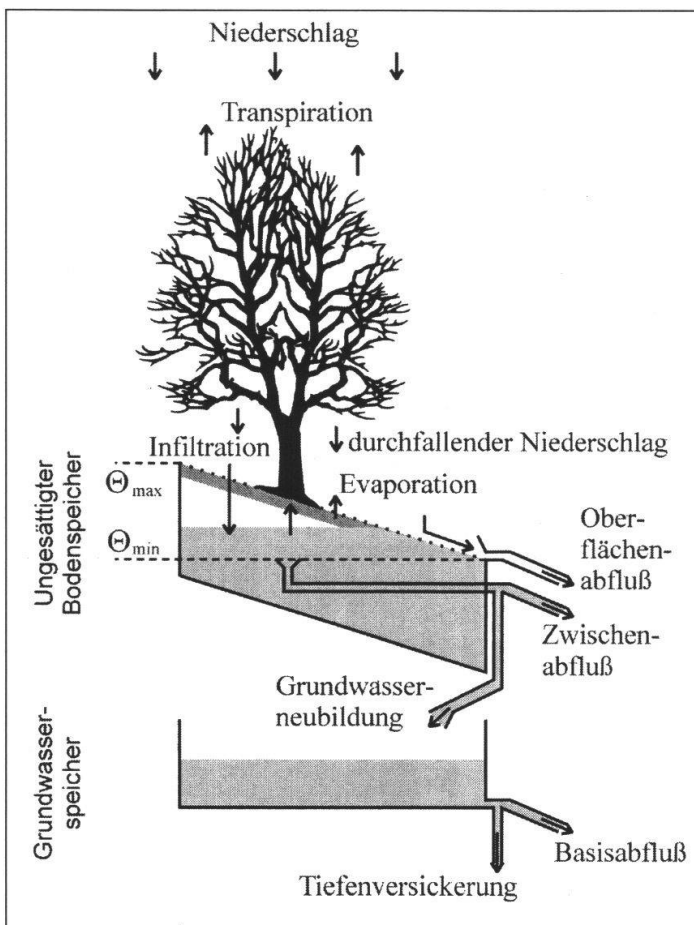


Fig. 3:

Anordnung der Wasser-Speicher und -Flüsse in einem Hang. Das Schema differenziert zwischen einem ungesättigten Bodenspeicher, der Evaporation und Transpiration, sowie den Bodenwasserfluss steuert, und einem gesättigten Bodenspeicher, der die Grundwasserzone abbildet. (Nach Kleindienst und Forster 1997).

ser obersten Bodenzone relativ grosse Poren, sogenannte Makroporen, die ebenfalls einen raschen Abfluss von eindringendem Wasser ermöglichen. Der Zwischenabfluss ist besonders dann hoch, wenn die Durchlässigkeit des Bodens mit der Tiefe abnimmt.

Ein grösserer oder kleinerer Teil des in den Boden infiltrierten Wassers kann ins Grundwasser eindringen und so zur Grundwasserneubildung beitragen. Dieses Wasser wird nicht mehr hochwasserwirksam. Ein Teil des Grundwasserspeichers kann das Einzugsgebiet über die Tiefensickerung verlassen, ohne je wieder an die Oberfläche zu gelangen. Diejenige Wassermenge, welche den Grundwasserspeicher über den Basisabfluss verlässt, fliesst mit kleinen Geschwindigkeiten ab und wird in kleinen Einzugsgebieten nicht hochwasserwirksam. Eine gewichtige Ausnahme bilden hier unter anderen verkarstete Einzugsgebiete, wo auch in grosser Tiefe zum Teil sehr grosse Hohlräume zu finden sind, die entsprechende Fliessgeschwindigkeiten ermöglichen.

Das Wasser, das den Hang als Oberflächen- oder Zwischenabfluss rasch verlässt, gelangt als Flächenabfluss ins nächste Gerinne (vgl. Fig. 4). Dort bildet es zusammen mit jenem aus weiter oben liegenden Hängen den Gerinneabfluss, welcher die weiter unten beschriebenen wildbachtypischen Prozesse des Feststoffhaushalts im Gerinne massgeblich beeinflusst. Neben den eigentlichen Abflussmengen ist im Gerinne auch die Fliessgeschwindigkeit ein entscheidender Parameter, da dieser darüber entscheidet, wie sich die Hochwasserwellen aus verschiedenen Teilen eines Einzugsgebiets überlagern. In vielen Einzugsgebieten hat der Umstand, ob die Spitzen aus den verschiedenen Teilgebieten gleichzeitig oder gestaffelt am Zusammenfluss eintreffen, einen grösseren Einfluss auf die Abflussspitzen als das gesamte Abflussvolumen. Die Geschwindigkeit in einem Gerinneabschnitt hängt vom Abfluss, dem Gefälle und der Rauigkeit ab, welche oft durch die Korngrösse des Bettmaterials beschrieben wird, sowie von der Wassermenge, welche im Gerinne gespeichert werden kann.

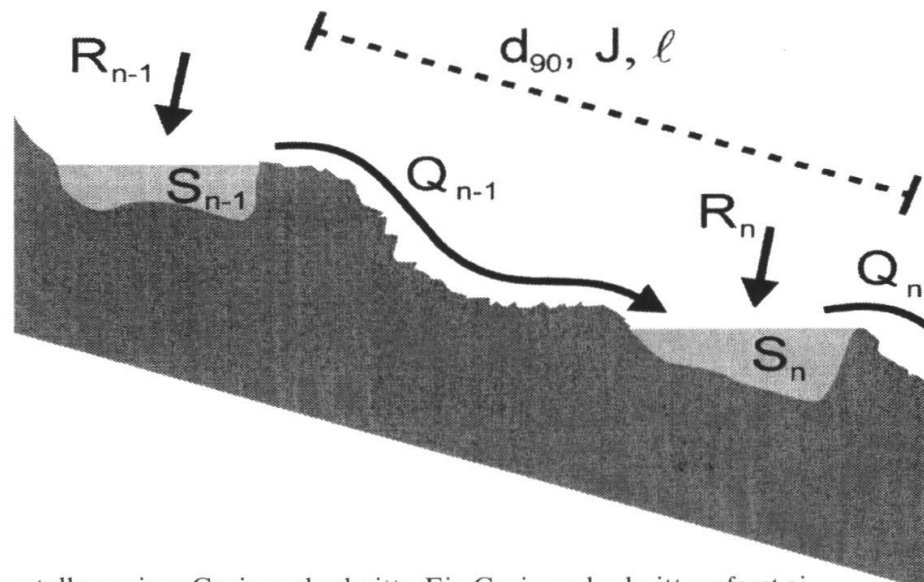


Fig. 4: Schematische Darstellung eines Gerinneabschnitts. Ein Gerinneabschnitt umfasst einen hydrologischen Speicher S_n , dessen Zufluss sich aus dem Flächenabfluss R_n der direkten anstossenden Hänge sowie dem Ausfluss Q_{n-1} der direkt oberhalb liegenden Gerinnespeicher S_{n-1} zusammensetzt. Die Fliesszeit in einem Gerinneabschnitt wird oft anhand des 90%-Quantils der Korngrössenverteilung (d_{90}), des mittleren Gefälles (J) sowie der Abschnittslänge (l) bestimmt. (Nach Kleindienst und Forster 2000).

2.3 Prozesse des Feststoffhaushalts

Grundsätzlich kann auch beim Feststoffhaushalt in einem Wildbach zwischen den Prozessen im Hang und jenen im Gerinne unterschieden werden. Im Gegensatz zum Wasserhaushalt, wo sowohl Abflussbildung im Hang als auch Abflussfortpflanzung im Gerinne bei einem Hochwasser von entscheidender Bedeutung sind, konzentriert sich das Hauptaugenmerk beim Feststoffhaushalt oft auf das eigentliche Gerinne und den unmittelbar anstossenden Gerinnebereich. Die Erfahrung lehrt nämlich, dass bei einem Hochwasser in der Regel etwa 80% der transportierten Feststoffmenge im unmittelbaren Gerinnebereich mobilisiert werden (vgl. Kienholz et al. 1991). Entsprechend kann man sich bei der Beurteilung der Gefährlichkeit von Wildbächen beim Feststoffhaushalt meistens auf den unmittelbaren Gerinnebereich beschränken.

Eine gewichtige und besonders gefährliche Ausnahme von dieser Regel, auf die hier aber nicht weiter eingegangen wird, bildet der punktuelle und massive Feststoffeintrag durch eine grössere Rutschung. Ein Beispiel dafür ist z.B. das Ereignis von Weesen im Mai 1999, das in Liener (2000) erläutert ist.

Alle Verlagerungen von Feststoffen in einem Wildbach lassen sich einem der folgenden drei zentralen Vorgänge zuordnen:

- Das Mobilisieren (in Bewegung setzen, aus dem bisherigen Verband herauslösen),
- das eigentliche Verlagern (Bewegen) und
- das Ablagern (zur Ruhe kommen) von Material.

Die nachfolgende Erläuterung der Prozesse des Feststofftransports in einem Wildbachgerinne ist deshalb nach diesen drei Vorgängen gegliedert.

2.3.1 Mobilisierung

Bei der Mobilisierung von Material in einem Wildbachgerinne können grob zwei Prozesse unterschieden werden, wobei die Grenze dazwischen fließend ist:

Mobilisierung einzelner Komponenten

Zur Mobilisierung von einzelnen Komponenten aus der Sohle oder der Böschung eines Bachbetts kommt es, wenn die Beanspruchung durch die Schleppspannung des fließenden Wassers gross genug ist, um ein Partikel aus seinem bisherigen Verband herauszureissen.

Die dazu notwendige Kraft hängt einerseits von der Grösse des Partikels ab, aber auch von der Art und Festigkeit seiner Einbindung in die Sohle bzw. Böschung. Die Schleppspannung ihrerseits hängt vom Gefälle und der Abflusstiefe ab. Diese Parameter werden von der Abflussmenge, vom Querprofil des Gerinnes, aber auch von der Rauigkeit der Sohle und der Böschungen beeinflusst. Die Schleppspannung schwankt zeitlich wie räumlich sehr stark.

Mobilisierung grösserer Kompartimente

Im Gegensatz zur Mobilisierung von Einzelkomponenten handelt es sich bei der Mobilisierung grösserer Kompartimente um einen episodischen Prozess, der nur unter bestimmten Bedingungen abläuft. Die weitere Verlagerung von grossen, auf

einen Schlag in Bewegung gesetzten Feststoffmassen erfolgt oft als Murgang. In einem Wildbachgerinne können derartige Mobilisierungen grundsätzlich auf zwei Arten geschehen:

- Verflüssigung der Bachsohle:
Unter der Auflast und der wirkenden Schleppkraft eines grossen Hochwassers kann es vorkommen, dass nicht mehr nur einzelne Partikel aus der Bachsohle herausgelöst werden, sondern dass grössere Teile der Sohle zusammen in einer Art Rutschung abscheren und in Bewegung geraten.
- Durchbruch einer Verklausung:
Bei einer Verklausung handelt es sich um eine mehr oder weniger lange dauernde Verstopfung des Gerinnebetts durch Unholz und/oder Geröll. Hinter einer derartigen Verklausung sammeln sich Wasser und Material an, das sich beim Bruch des Abflusshindernisses als Ganzes in Bewegung setzt. Eine Verklausung kann auch die Folge eines seitlichen Materialeinstosses durch eine Rutschung sein.

2.3.2 Verlagerung

Im Gerinne aufgenommenes bzw. dem Gerinne aus dem Hang zugeführtes Material wird durch das Bachsystem hindurch auf den Schwemmkegel bzw. in den Vorfluter verlagert. Dabei wird zwischen drei Verlagerungsformen unterschieden:

- Schwebstofftransport:
Verlagerung von Feststoffen in einem Gerinne ohne Kontakt zur Gerinnesohle, wobei diese Partikel vor allem durch die Turbulenz der Strömung in der Schwebe gehalten werden.
- Geschiebetransport:
Rollende, gleitende oder springende Verlagerung von Feststoffen entlang der Sohle des Gerinnes unter der Wirkung der Schleppspannung des Wassers.
- Murgang
 - nach GHO (1982): «Abfluss eines Gemisches von Wasser und Feststoffen mit hoher Feststoffkonzentration».
 - nach DIN 19663 (1985): «Muren sind eine wildbachtypische Sonderform der Hochwasserabflüsse. Sie sind Gemische aus Wasser und Feststoffen (Boden, Gesteinsschutt aller Korngrössen, Holz). Sie bewegen sich in Wildbachbetten oder Hangfurchen schnell bis sehr schnell zu Tal und erreichen den Vorfluter unmittelbar oder entmischen sich im Bereich abnehmenden Gefälles, wobei sich die Feststoffe ganz oder teilweise in Umlagerungsstrecken, auf Schwemmkegeln oder im Talboden ablagern. Muren entstehen durch starke Feststoffeinstösse, beim Durchbruch von Verklausungen oder bei Dammbrüchen».

Bei sonst gleichen Bedingungen werden in einem Bach kleinere Partikel als Schwebstoff und grössere als Geschiebe transportiert. Bei welchem Korndurchmesser die Grenze zwischen Schwebstoff und Geschiebe liegt, hängt von der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers ab. In einem Wildbach ändert sich diese Geschwindigkeit sehr rasch innerhalb einer grossen Bandbreite. Die Unterscheidung zwischen 'Schwebstofftransport' und 'Geschiebetransport' ist deshalb oft schwierig.

2.3.3 Ablagerung

Zu Ablagerungen kommt es in einem Wildbachgerinne dann, wenn die Transportkapazität des Wassers so stark nachlässt, dass nicht mehr alles mobilisierte Material weiterbewegt werden kann. Ausgelöst werden kann eine solche Abnahme der Transportkapazität durch eine geringere Abflusstiefe (z.B. bei einer Verbreiterung des Gerinnequerschnitts) oder durch abnehmende Fliessgeschwindigkeiten in einer Verflachung. Beim Schwebstofftransport und beim Geschiebetransport wird mit abnehmender Transportkapazität immer mehr Material abgelagert. Einzig beim Murgang kann es auch zu einem plötzlichen Stillstand kommen.

3. Verfahren zur Beurteilung von Prozessen in Wildbächen

Die nachfolgend beschriebenen Verfahren zur Beurteilung von Prozessen in Wildbächen zielen darauf ab, das Ausmass von seltenen grossen Ereignissen zu bestimmen. Dies bildet die Grundlage für Gefahrenbeurteilungen und die Bemessung von allenfalls zu errichtenden Bauwerken. Die Verfahren sind nicht zur Bestimmung von mittleren Verhältnissen geeignet.

Bei Gefahrenbeurteilungen in Wildbächen sind in der Regel die drei Elemente Niederschlag - Abfluss - Feststofftransport in dieser Reihenfolge zu bearbeiten. Die nachfolgenden Erläuterungen sind entsprechend gegliedert. Sie beschränken sich aber auf eine kommentierte Zusammenstellung der wichtigsten Literaturhinweise, da eine vollständige Beschreibung von Verfahren den Rahmen des vorliegenden Artikels sprengen würde. Oft ist es zudem so, dass es weniger eine möglichst detaillierte Beschreibung ist, welche die zuverlässige Anwendung einer Methode erlaubt, sondern es zählt die Erfahrung im Umgang mit den entsprechenden Verfahren. Bei den Kommentaren liegt das Schwergewicht vor allem im Aufzeigen von neuesten Entwicklungen, die zum Teil noch nicht publiziert sind.

Die wichtigsten Grundsätze für die Beurteilung von Wildbachgefahren sind in den «Empfehlungen zur Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten» (BWW et al. 1997) zusammengestellt. Einen Überblick zur Beurteilung von Naturgefahren allgemein vermittelt z.B. Heinimann et al. (1998).

3.1 Niederschlag

Der Niederschlag bildet mit seinen Parametern Dauer und Intensität für die meisten Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten eine unverzichtbare Eingangsgrösse. Wichtigste Grundlage für die Bestimmung von sogenannten Bemessungsniederschlägen bilden entweder der hydrologische Atlas der Schweiz (Tafeln 2.4 bzw. 2.4², HADES 1992) oder Niederschlagsauswertungen für unmittelbar in der Nähe des zu untersuchenden Einzugsgebiets gelegene Messstationen (Zeller et al. 1976–1992).

Die in Zeller et al. (1976–1992) im Hinblick auf Starkniederschläge ausgewerteten Daten von Niederschlagsmessstationen umfassen in der Regel die Daten bis 1970, zum Teil bis 1975. Es kann deshalb je nach Problemstellung und Umfang der Arbeiten durchaus angezeigt sein, neuere Messdaten in spezifischen Auswertungen zusätzlich zu berücksichtigen. Die methodischen Grundlagen dazu sind in Band 7 von Zeller et al. (1976–1992) ausführlich dargelegt.

Die beiden Tafeln 2.4 und 2.4² des HADES (1992) basieren auf den gleichen Daten

und den Auswertungen von Zeller et al. (1976–1992) und unterscheiden sich nur in der verwendeten räumlichen Interpolationsmethode. In Forster und Baumgartner (1999) ist ein Verfahren vorgeschlagen, wie aus diesen beiden Karten unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Intensität von Starkniederschlägen in den letzten Jahrzehnten höher ist als in der Periode 1900–1970, möglichst zuverlässige Bemessungsniederschläge bestimmt werden können.

3.2 Abfluss

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Verfahren zur Bestimmung von Hochwasserabflüssen in Wildbächen entwickelt. Diese reichen von einfachsten empirischen Verfahren, bei welchen im Wesentlichen die Einzugsgebietsfläche als variabler Parameter eingeht, über aufwendigere Methoden, welche umfangreiche Erhebungen im Feld bedingen (z.B. Zeller 1981 oder Scherrer 1997), bis zu Modellen mit so zahlreichen Parametern, dass sie praktisch nur noch in instrumentierten Einzugsgebieten angewendet werden können.

Die Erfahrung hat nun gezeigt, dass kaum ein Verfahren in der Lage ist, unter allen Umständen zuverlässige Resultate zu erzielen. Je nach Eigenschaften und Charakteristik eines Gebiets eignet sich das eine oder das andere Verfahren besser oder weniger gut. Die besten Bemessungsgrundlagen werden deshalb oft durch eine Kombination verschiedener Ansätze erreicht. Entsprechende Vorschläge sind zur Zeit an der WSL in Bearbeitung und werden im Verlaufe der Jahre 2001/2002 publiziert.

3.3 Feststofftransport

Ein konkreter Verfahrensvorschlag zur Bestimmung von Feststofffrachten in Wildbächen ist in Spreafico et al. (1996) erläutert. Dabei wird vor allem zwischen murfähigen und nicht murfähigen Wildbächen unterschieden. Das Verfahren basiert im Wesentlichen auf dem Kenntnisstand zu Beginn der 1990er Jahre; die entsprechenden Grundlagen sind in Lehmann (1993) und Lehmann et al. (1996) zusammengestellt. Seither wurden gewisse neue Erkenntnisse erlangt, die in Spreafico et al. (1996) noch nicht berücksichtigt werden konnten, und die deshalb nachfolgend kurz erläutert werden. Die dort grundsätzlich vorgeschlagene Vorgehensweise ändert sich deswegen aber nicht und ist immer noch zielführend und zweckmässig.

In Spreafico et al. (1996) ist unter anderem ein Vorschlag zur Bestimmung der massgebenden Abflüsse enthalten, der nach dem Vorliegen der im vorangehenden Abschnitt Abfluss erwähnten Publikationen gewisse Anpassungen erfordern wird. Weniger einfach zu lösen werden die Unsicherheiten sein, die in Bezug auf den Feststofftransport bestehen, sei es nun beim 'normalen' Geschiebetransport oder bei den Murgängen. Im Zentrum der Untersuchungen steht dabei die Bestimmung der sogenannten Transportkapazität, d.h. die Frage, welche Feststoffmenge in einem Gerinne bei einem gegebenen Abfluss transportiert werden kann.

Bis in die 1980er Jahre gab es keine Berechnungsgrundlagen für den Geschiebetransport, welche auch für Gefällsverhältnisse kalibriert waren, wie sie in Wildbächen die Regel sind. Entsprechende Arbeiten wurden erstmals an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich durchgeführt, wo aufgrund von Laborexperimenten Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Transportkapazität vorgeschlagen wurden (Smart und Jäggi 1983, Rickenmann

1990). Der Vergleich der Ergebnisse dieser Verfahren mit abgelaufenen Ereignissen in der Natur zeigte allerdings, dass diese eine maximale Transportkapazität angeben, welche in der Natur nur unter bestimmten Umständen erreicht werden kann. Aufgrund der in einem natürlichen Gerinne wegen Kurven, groben Blöcken, Querschnittsveränderungen etc. im Vergleich zu Laborrinnen in der Regel zusätzlich vorhandenen Energieverluste, liegt die effektive Transportkapazität um bis zu eine Grössenordnung oder mehr unter der berechneten maximalen Kapazität (Rickenmann 1997, im Druck). Besonders eindrücklich zeigt dies die Analyse der weltweit einzigen zeitlich hochaufgelösten Messreihe zum Geschiebetransport in einem Wildbach aus dem Einzugsgebiet des Erlenbachs (Alptal, SZ) – einem Testgebiet der WSL – die z.B. in Hegg & Rickenmann (2000) beschrieben ist.

Bis heute sind allerdings erst Ansätze zu Verfahren vorhanden, welche eine genauere Bestimmung der effektiven Transportkapazität erlauben. So wurde insbesondere noch kein Schlüssel gefunden, wie die in einem natürlichen Gerinnebett vorhandenen Energieverluste für die Bestimmung der Differenz zwischen maximaler und effektiver Transportkapazität herangezogen werden könnten. In der in Spreafico et al. (1996) vorgeschlagenen Vorgehensweise wird deshalb nicht mit den effektiven Transportkapazitäten gerechnet, sondern mit den maximalen, da sich bis jetzt nur diese bestimmen lassen. Damit trotzdem vernünftige Ergebnisse erzielt werden können, wird statt dem gesamten nur das sogenannte mobilisierbare Feststoffpotential berücksichtigt. Dieses entspricht jener Geschiebemenge, die bei einem Ereignis voraussichtlich in Bewegung gesetzt wird. Dabei handelt es sich oft nur um einen Bruchteil des gesamten Feststoffangebots. Dieses mobilisierbare Feststoffpotential muss vom Bearbeiter geschätzt werden, was nur mit viel Erfahrung einigermaßen zuverlässig möglich ist.

Noch etwas schwieriger präsentiert sich die Situation bei den Murgängen, gibt es hier doch kaum erprobte Verfahren zur Bestimmung der Transportkapazität. Verschiedenes deutet aber darauf hin, dass mit den Verfahren wie sie für den Geschiebetransport in Wildbächen entwickelt wurden, sinnvolle Ergebnisse erzielt werden können. Oft müssen deshalb Ereignisfrachten anhand des gesamten Feststoffpotentials und mit einfachen Abschätzformeln bestimmt werden, wie sie z.B. in Rickenmann (1995, 1999) dargestellt sind. In vielen Fällen ist es zudem angezeigt, zu überprüfen, ob der Abfluss, der in einem Einzugsgebiet vernünftigerweise erwartet werden kann, das vorhandene Feststoffpotential als Murgang verlagern kann oder ob die zu erwartende Murenfracht dadurch begrenzt wird.

Zusätzlich erschwert wird die Beurteilung von Murgängen dadurch, dass es sich dabei um einen brüskten Prozess handelt. Im Gegensatz zum graduellen Prozess Geschiebetransport, der z.B. bei einem Gefällsknick so lange kontinuierlich Material ablagert, bis Transportkapazität und Feststofffracht wieder in einem Gleichgewicht sind, kommt ein Murgang oft plötzlich als Ganzes zum Stillstand. Nebst der Frachtbestimmung stellt sich bei Murgängen deshalb ähnlich wie bei den Lawinen vor allem das Problem der Bestimmung der Reichweite. Auch hierzu sind in Rickenmann (1995, 1999) einige einfache Abschätzformeln erläutert. Weitergehende Verfahren und Modelle befinden sich zur Zeit an verschiedenen Institutionen in Entwicklung. Beispiele für derartige Ansätze sind z.B. die in Rickenmann und Koch (1997) diskutierten Modelle.

4. Hin zu einem integralen Risikomanagement

Mit der Beurteilung von Abflussmengen und Feststofffrachten ist die Arbeit in aller Regel nicht abgeschlossen (vgl. z.B. Kienholz 1993 oder Heinimann et al. 1998). Vielmehr gilt es dann die durch diese Arbeiten bestimmte Gefahr mit dem sogenannten Schadenpotential (Menschen und/oder Güter, die durch den betrachteten Prozess beeinträchtigt werden können) zu vergleichen und das entsprechende Risiko zu bestimmen, d.h. abzuschätzen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein wie grosser Schaden zu erwarten ist. Dieses Risiko ist mit jenem zu vergleichen, das wir bereit sind zu akzeptieren. Dieses sogenannte akzeptierte Risiko ist immer grösser als Null, da es grundsätzlich zu fast jeder möglichen Massnahme ein Ereignis gibt, das deren Schutzwirkung übersteigt und entsprechend zu Schäden führt. Die Bestimmung dieser oft mit dem Begriff Restrisiko beschriebenen verbleibenden Gefährdung ist nicht das Ergebnis einer wissenschaftlichen Analyse, sondern einer politischen und gesellschaftlichen Bewertung.

Übersteigt das effektive Risiko jenes das wir bereit sind zu akzeptieren, sind mögliche Massnahmen zu überprüfen. Dabei kann zwischen aktiven Massnahmen und passiven Massnahmen unterschieden werden. Aktive Massnahmen beeinflussen den Prozess in seinem Ablauf z.B. durch das Verbauen eines Wildbachgerinnes. Wichtige Grundsätze zur Bemessung und zur Konstruktion von Wildbachverbauungen sind in Böll (1997) zusammengestellt. Mit passiven Massnahmen wird versucht das Schadenpotential zu verkleinern. Die wichtigste Massnahme in dem Zusammenhang ist das Ausscheiden von Bauverbotszonen, in welchen aufgrund der Intensität des Prozesses mit der Gefährdung von Menschenleben und mit der Zerstörung von Gebäuden gerechnet werden muss. Bei einer Gefährdung von geringerer Intensität kann der potentielle Schaden oft durch einfache bauliche Massnahmen an gefährdeten Objekten, z.B. hochgezogene Lichtschächte oder Verstärkung der bergseitigen Mauer, stark reduziert werden. Einen Überblick dazu vermittelt die Richtlinie Objektschutz der Gebäudeversicherung des Kantons St. Gallen (1999).

Oft sind bei einer vorhandenen Gefährdung verschiedene Massnahmen denkbar. Meist stellt sich auch die Frage nach der ökonomischen Vertretbarkeit der Kosten, z.B. bei einer Sperrenstaffel in einem Wildbach. Mit den Methoden der Kosten-Wirksamkeitsanalyse wie sie in Wilhelm (1997) in den letzten Jahren am Beispiel der Lawinen entwickelt wurde, können unterschiedliche Massnahmen auf ihre Kostenwirksamkeit überprüft und verglichen werden. Die Übertragung dieser Methodik auf Wildbachgefahren ist zur Zeit unter anderem an der WSL und am Geographischen Institut der Universität Bern in Bearbeitung (Romang et al. 2000).

All diese Entwicklungen werden, zusammen mit zahlreichen anderen Arbeiten, letztlich erst den von der Nationalen Plattform für Naturgefahren (PLANAT 1998) geforderten Wechsel von der «Gefahrenabwehr zu einer Risikokultur» ermöglichen und ein integrales Risikomanagement für Naturgefahren erlauben. Es ist deshalb davon auszugehen, dass sich in der Beurteilungsmethodik für Wildbäche, aber auch im dahinter stehenden Prozessverständnis, in der nächsten Zeit noch einige Veränderungen ergeben werden.

Die Tatsache, dass der Kenntnisstand bei vielen Fragen im Zusammenhang mit den von Wildbächen ausgehenden Gefahren noch ein erhebliches Verbesserungspotential aufweist, darf uns aber nicht davon abhalten, diese Fragen schon heute

nach bestem Wissen und Gewissen anzugehen. Es gilt auch und gerade hier die Regel «Lieber rechtzeitig eine brauchbare Lösung, als eine perfekte Antwort zu spät». Die oben vorgestellten Verfahren liefern brauchbare Resultate, sofern sie von erfahrenen Fachleuten umsichtig eingesetzt werden.

Literatur

- BÖLL, A. 1997: Wildbach und Hangverbau. Berichte 343, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf.
- BWW, BRP, BUWAL 1997: Empfehlungen Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. EDMZ, Bern.
- DIN 19663, 1985: Wildbachverbauung; Begriffe, Planung und Bau. Deutscher Normenausschuss, Berlin.
- FORSTER, F. & BAUMGARTNER, W. 1999: Bestimmung seltener Starkniederschläge kurzer Dauer - Fallbeispiele im Vergleich mit den schweizerischen Starkniederschlagskarten. Schweiz. Z. Forstwes. 150. Jg. H. 6: 209–218.
- GEBÄUDEVERSICHERUNG DES KANTONS ST. GALLEN 1999: Richtlinie Objektschutz gegen Naturgefahren. St. Gallen.
- GHO, ARBEITSGRUPPE FÜR OPERATIONELLE HYDROLOGIE 1982: Verzeichnis hydrologischen Fachausdrücke mit Begriffserklärung. Mitt. Nr.2, Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- HADES 1992: Hydrologischer Atlas der Schweiz, EDMZ, Bern.
- HEGG, CH. 1997: Zur Erfassung und Modellierung von gefährlichen Prozessen in steilen Wildbacheinzugsgebieten. Geographica Bernensia, G52, Geogr. Inst. Univ. Bern.
- HEGG, CH., BADOUX, A., BASSI, A. & SCHMID, F. 2001: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2000. Wasser, Energie, Luft, 93. Jg., Heft 5/6, Baden. (im Druck)
- HEGG, CH. & RICKENMANN, D. 2000: Geschiebetransport in Wildbächen - Vergleich zwischen Feldmessungen und einer Laborformel. Interpraevent, Tagungspubl., Bd. 3: 117–128, Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung, Klagenfurt.
- HEINIMANN, H.R., HOLLENSTEIN, K., KIENHOLZ, H., KRUMMENACHER, B. & MANI, P. 1998: Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren. BUWAL, Bern.
- KIENHOLZ, H. 1993: Naturgefahren - Naturrisiken im Gebirge. Naturgefahren - Forum für Wissen 1993:7–21, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf.
- KIENHOLZ, H., LEHMANN, C., GUGGISBERG, C., LOAT, R. & HEGG, C. 1991: Bedload Budget in Swiss Mountain Torrents with Respect to the Disasters in 1987. Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. Bd. 83, 53–62, Stuttgart.
- KLEINDIENST, H. & FORSTER, F. 2000: Bemessungshochwasser in kleinen Wildbacheinzugsgebieten - Was bringt ein hydrologisches Prozessmodell gegenüber einfachen Schätzformeln. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 44. Jg. Heft 1: 9–19.
- LEHMANN, C. 1993: Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen, Grundlagen und Anleitung. Geographica Bernensia, G42, Geogr. Inst. Univ. Bern.
- LEHMANN, C., SPREAFICO, M. & NAEF, O. 1996: Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen, Teil II Fachliche Grundlagen und Fallbeispiele. Mitt. Nr. 4 der Gruppe für operationelle Hydrologie, Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- LIENER, S. 2000: Die Rutschung Flyalp und ihre Auswirkungen auf den Flybach (Weesen, SG). Bull. angew. Geol., Vol. 5, Nr. 1, 139–145.
- PLANAT 1998: Von der Gefahrenabwehr zur Risikokultur. Planat, die nationale Plattform Naturgefahren stellt sich vor. Biel.
- RICKENMANN, D. 1990: Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitt. Nr. 103 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.

- RICKENMANN, D. 1995: Beurteilung von Murgängen. Schweizer Ing. und Architekt, Nr. 48, 1104–1108, Zürich.
- RICKENMANN, D. 1997: Sediment transport in Swiss torrents. *Earth surface processes and landforms*. Vol. 22, 937–951.
- RICKENMANN, D. 1999: Empirical relationships for Debris Flows. *Natural Hazards* 19: 47–77.
- RICKENMANN, D. im Druck: Comparison of bedload transport in torrents and gravel-bed streams. Accepted for publication in *Water Resources Research*.
- RICKENMANN, D. & KOCH, T. 1997: Comparison of debris flow modelling approaches. In: Chen, Ch. (ed.) *Debris-Flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and assessment*: 576–585. Am. soc. of Civil Engineers.
- ROMANG, H., KIENHOLZ, H. & BÖLL, A. 2000: Wirksamkeit und Kosten von Wildbachschutzmassnahmen - ein Studienkonzept. *Interpraevent, Tagungspubl.*, Bd. 3, 271–282, Forschungsgesellschaft für vorbeugende Hochwasserbekämpfung, Klagenfurt.
- SCHERRER, S. 1997: Abflussbildung bei Starkniederschlägen, Identifikation von Abflussbildungsprozessen mittels künstlicher Niederschläge. Mitt. Nr.147 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- SMART, G.M. & JAEGGI, M.N.R. 1983: Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitt. Nr. 64 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- SPREAFICO, M., LEHMANN, C. & NAEF, O. 1996: Empfehlungen zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen, Teil I Handbuch. Mitt. Nr. 4 der Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie, Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- WILHELM, CH. 1997: Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz. Methodik und Erhebungen zur Beurteilung von Schutzmassnahmen mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung. Mitt. Nr. 54 des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.
- ZELLER, J. 1981: Starkniederschläge und ihr Einfluss auf Hochwasserereignisse, Elemente zur Abschätzung der Hochwasserabflüsse kleiner Einzugsgebiete. 2. Auflage des Berichts Nr. 126 der Eidg. Forschungsanstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf.
- ZELLER, J., GEIGER, H. & RÖTHLISBERGER, G. 1976 - 1992: Starkniederschläge des Schweizerischen Alpen und Alpenrandgebietes Bd. 1–9. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.