

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Forstverein
<b>Band:</b>	145 (1994)
<b>Heft:</b>	1
 <b>Artikel:</b>	Hochwasser
<b>Autor:</b>	Forster, Felix / Keller, Hans M. / Rickenmann, Dieter
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-766574">https://doi.org/10.5169/seals-766574</a>

### 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:** 08.01.2026

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

# Hochwasser<sup>1</sup>

Von Felix Forster, Hans M. Keller, Dieter Rickenmann,  
Gerhard Röthlisberger

FDK 116.2:945.4

## 1. Einleitung

Der Begriff «Hochwasser» wird schon seit Jahrhunderten verwendet, tritt in vielen alten Chroniken auf und ist dem Menschen seit je als Inbegriff einer Naturgefahr bekannt. Gerade im Gebirgsland Schweiz lassen sich unter diesem Thema viele Gegebenheiten zusammenfassen, welche in historischer Sicht von grosser Bedeutung sind. Die kürzlich erschienenen Arbeiten (Röthlisberger, 1991; Röthlisberger und Keller, 1992) geben interessante Hinweise auf das sehr wechselhafte Auftreten von Hochwasser, sei es in räumlicher oder zeitlicher Hinsicht. Mit dem Aufzeichnen der Hochwasserereignisse in der Schweiz (zum Beispiel Röthlisberger, 1992) wird wohl ein wichtiger Aspekt der Geschichte abgedeckt. Auch die Hochwasseralysen, wie sie vom Amt für Strassen- und Flussbau und der Landeshydrologie und -geologie (ASF, 1974; LHG, 1986, 1988, 1991) durchgeführt wurden, sind äusserst wertvolle Beiträge, die Häufigkeit des Auftretens von Hochwassern in der Schweiz zu erfassen. Um das Phänomen der Hochwasser, deren Entstehung und Bedeutung besser zu verstehen, sind wir aber auf weitergehende Untersuchungen angewiesen.

Die Hochwasserforschung an der WSL hat eine lange Tradition. Angefangen hat sie mit der Errichtung der Wassermessstationen im Emmental, im Rappen- und Sperbelgraben durch die damalige FVA (forstliche Versuchsanstalt) im Jahre 1902. Diese vergleichenden Studien werden immer noch fortgesetzt und ergeben ein breites Datenmaterial über die Häufigkeit des Auftretens von Abflussspitzen während einer unterdessen 90jährigen, beinahe lückenlosen Beobachtungsperiode (vgl. Abbildung 1). Die Hochwasserforschung an der WSL hat sich stets in erster Linie mit dem Aspekt Hochwasser und Wald befasst. Einerseits geht es um die Ermittlung guten und

<sup>1</sup> Nach einem Referat, gehalten am 28. Januar 1993 anlässlich der Tagung «Forum für Wissen» an der WSL in Birmensdorf.

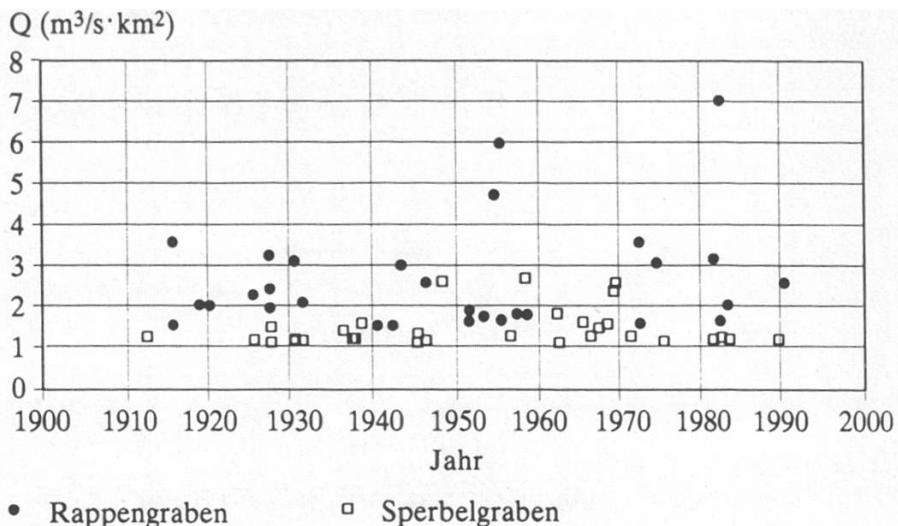


Abbildung 1. Die 30 höchsten monatlichen Abflussspitzen in zwei voralpinen Bächen im Emmental (Kanton Bern) seit Beginn der Abflussmessungen im Jahre 1902. Die Einzugsgebietsflächen betragen weniger als  $1 \text{ km}^2$ . Auffällig ist die grösse Streuung der Daten für den Rappengraben, der einen wesentlich kleineren Waldanteil (35 %) aufweist als der Sperbelgraben (97 %).

verlässlichen Datenmaterials; andererseits interessieren uns die Wasserflüsse, die zum Abfluss grosser Wassermengen führen und Ursache für Erosion, Rutschungen, Feststofflieferung zum Gerinne und Geschiebetransport im Gerinne sind (Prozessforschung). Im Mittelpunkt stehen relativ kleine Bäche und Wildbäche im voralpinen und alpinen Gebiet, wo der Wald natürlich kommt und einen Einfluss auf das Abflussgeschehen hat.

Heute ist vor allem eine differenzierte Quantifizierung dieses Einflusses gefragt. Es soll untersucht werden, wie und wo verschiedene Waldformen den Abfluss des Wassers beeinflussen und welches die Grenzen der Waldwirkungen bei der Entstehung von Hochwassern und demzufolge bei der Erosion und bei den Prozessen des Geschiebetransportes sind.

Die beiden erwähnten Aspekte der Datenerhebung und der Prozessforschung sind bis vor kurzem eher nebeneinander bearbeitet worden. Heute zeichnet sich aber bereits ein viel intensiveres Zusammengehen ab. Einerseits ist es von der Qualität der Daten sowie vom statistisch aussagekräftigen Umfang und von der Vielfältigkeit her bereits möglich, Ansätze für Modelle und Hypothesen der Ursächlichkeit abzuleiten. Andererseits sind für die Untersuchung der Prozesse neuerdings Daten einer erheblichen Anzahl Ereignisse mit hoher zeitlicher Auflösung vorhanden, allerdings nur für ganz wenige Gebiete. Ein von der EG mitfinanziertes Programm der Alpenländer bietet die Möglichkeit, diese Prozessstudien auf eine grösse Anzahl Gebiete auszudehnen.

Im folgenden wird versucht, die heutigen Kenntnisse, insbesondere mit Bezug auf die eigenen Arbeiten, zusammenzufassen. Betrachtet werden Fragen der Hochwasserentstehung und der Geschiebeverfrachtung. Dabei geht es

auch um den Einfluss der Witterung und der Vorgeschichte sowie um die Rolle der Topographie und der Bodenverhältnisse. Der Vegetationsdecke als weiterem Einflussfaktor, insbesondere dem Wald in seinen verschiedenen Formen, kommt besondere Bedeutung zu.

## 2. Hochwasserbildung

Die Reaktion eines Bach-Einzugsgebietes im Gebirge auf einen Niederschlag wird in erster Linie durch dessen Menge und Intensität bestimmt. Sie hängt aber auch von den topographischen Bedingungen (Form des Gebietes, Gerinnendichte, Steilheit usw.), von den Bodeneigenschaften wie Durchlässigkeit und Speicherfähigkeit sowie von der Vegetationsdecke ab. Diese Parameter sind nicht nur für den «reinen» Hochwasserabfluss von Bedeutung, sondern auch bestimmend für jene Zonen und Flächen im Gebiet, die anfällig sind für die Geschiebelieferung (Geschiebeherde).

### 2.1 Fliessvorgänge im Einzugsgebiet

Die bei einem Hochwasser ablaufenden Fliessvorgänge sind vereinfacht in *Abbildung 2* dargestellt. Fällt ein Regentropfen zur Erde, wird er entweder von der Pflanzendecke zurückgehalten, oder er gelangt direkt auf den Boden. Wenn der Wassertropfen auf seinem Sickerweg durch den Boden nicht durch Evaporation oder Transpiration wieder an die Atmosphäre gelangt, findet er irgend einen Weg ins Bachgerinne oder versickert in die tieferen Gesteinschichten (Grundwasser).

Auf dem Sickerweg zum Bachgerinne herrschen vertikale und hangparallele Wasserbewegungen vor. Welche Bewegungen wann und wo auftreten, wird durch die Geologie, den Boden, die Topographie sowie die meteorologischen Bedingungen bestimmt. Für den Hochwasserabfluss ist im wesentlichen der oberflächennahe Abfluss [(1) in *Abbildung 2*] und unter bestimmten Bodenverhältnissen auch der Wasserfluss in der obersten Bodenzone massgebend (Zwischenabfluss, Interflow [(2) in *Abbildung 2*]) (Zuidema, 1985). Ob das Regenwasser überhaupt in den Boden eindringen kann, wird vor allem von der Durchlässigkeit und der Vorfeuchte des Bodens bestimmt. Die Infiltration kann durch Makroporen (Wurzelkanäle, Tiergänge usw.) erheblich beschleunigt oder durch Verdichtung der Bodenoberfläche oder durch Bodenfrost verlangsamt werden.

Im Verlauf eines Niederschlagsereignisses nimmt der Wassergehalt im Boden zu, der Wasserspiegel im Boden steigt und die Zonen voller Bodensättigung im Gebiet vergrössern sich. Insbesondere in der Nähe von Gerinnen, in

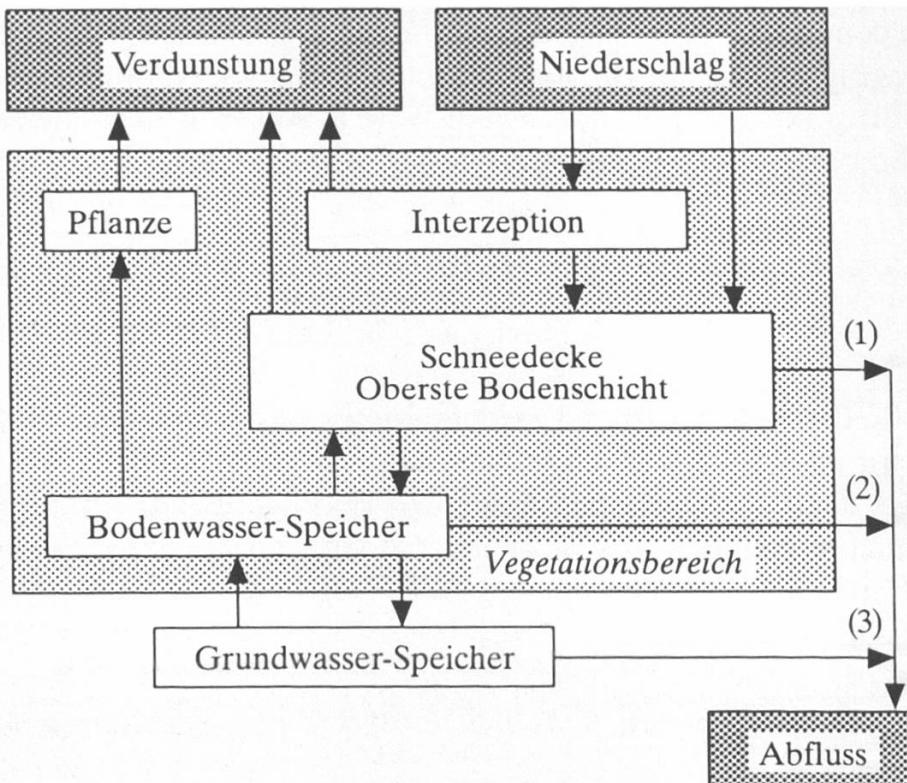


Abbildung 2. Schematische und vereinfachte Darstellung der bei der Hochwasserbildung beteiligten Prozesse. Die Rechtecke stellen Speicherelemente dar, die den Abfluss des Niederschlagswassers verzögern. Die wichtigsten Komponenten der dazugehörigen Fließvorgänge sind der oberflächennahe Abfluss (1), der Zwischenabfluss (2) sowie der Grundwasserabfluss (3).

Mulden und oberhalb von wasserstauenden Schichten bilden sich voll gesättigte Bodenzonen. Dort fliesst das Wasser oberflächlich ab, und zusammen mit dem Abfluss aus kleinen Rinnen, Gräben oder Runsen gelangt es schnell in das Hauptgerinne. Dieser Prozess kommt zustande, wenn die Niederschlagsintensität grösser ist als die Infiltrationsrate des Bodens oder wenn der bis an die Bodenoberfläche reichende Wasserspiegel ein weiteres Versickern des Niederschlagswassers verhindert (*Abbildung 3*). Die Bodenmächtigkeit über der wasserstauenden Schicht, die Durchlässigkeit und das Speichervermögen dieses Bodens spielen neben Niederschlagsmenge und -intensität die Hauptrolle bei der Entstehung des oberflächennahen Abflusses.

Die Porenstruktur des Bodens beeinflusst aber auch die Wasserflüsse im gesamten Bodenprofil. Je kleiner die Poren sind, desto kleiner wird die Durchlässigkeit. Bei geringen Durchlässigkeiten ist dieser Wasserweg für den Hochwasserabfluss nicht relevant. Falls hingegen Bodenschichten mit grobem Korngerüst in flächenhafter Ausdehnung vorhanden sind, kann dieser Wasserweg für den Hochwasserabfluss sehr wohl von Bedeutung sein.

Alle Wasserwege, die gegenüber dem oberflächennahen Abfluss deutlich verzögert sind (tiefer gesickertes Wasser, Grundwasserabfluss [(3) in *Abbildung 2*]), haben für den Hochwasserabfluss in der Regel keine Bedeutung.

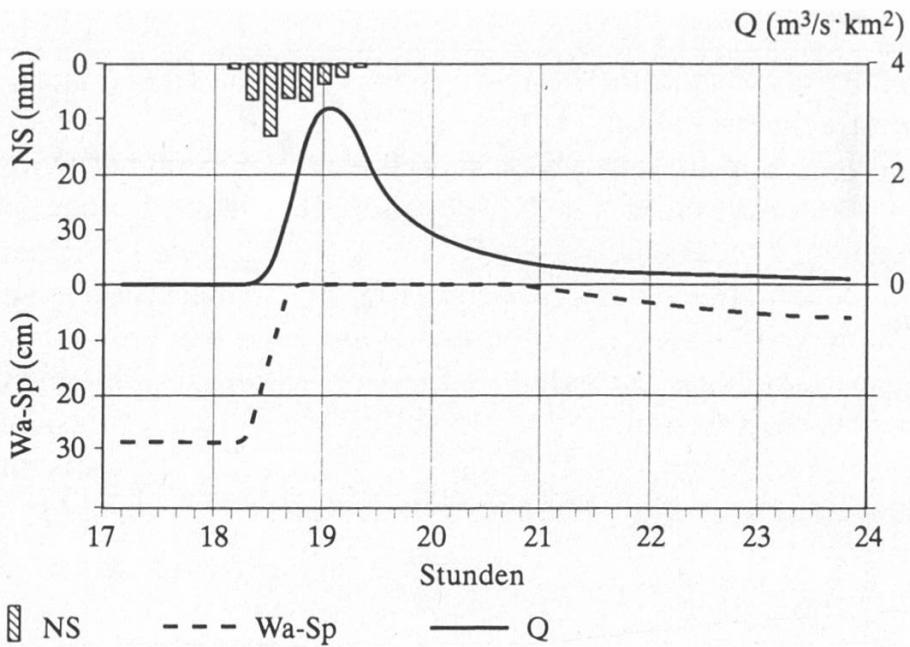


Abbildung 3. Hochwasser im Kleingebiet Rotenbach (Schwarzsee, Kt. Freiburg) vom 29. Juni 1992, das mehrheitlich durch oberflächennahen Abfluss ( $Q$ ) aufgrund eines starken Niederschlages (NS) und rascher Sättigung des Bodenspeichers entstanden ist. Innerhalb von 20 Minuten stieg der Wasserspiegel (Wa-Sp) im Boden bis an die Oberfläche und bewirkte die Bildung von oberflächennahem Abfluss.

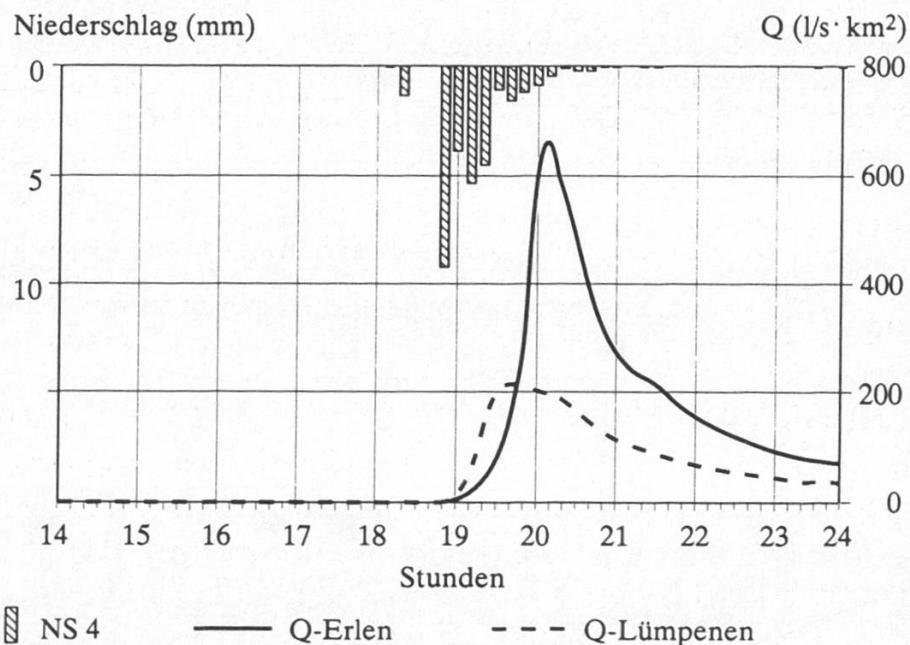


Abbildung 4. Niederschlagsereignis vom 11. September 1991 im Alptal (Kanton Schwyz): Nach einer längeren sommerlichen Trockenheit (in den letzten 9 Tagen vor dem 11. September 1991 fiel kein Niederschlag; während der 4 Wochen vor dem 11. September 1991 waren es gesamthaft lediglich 18 mm Niederschlag) fielen rund 35 mm Niederschlag, der in den beiden Einzugsgebieten des Lümpenen- und des Erlenbaches sehr unterschiedliche Abflussreaktionen auslöste.

Die Geologie ist die wesentlichste Voraussetzung für die Bodeneigenschaften, wie wir sie in einem bestimmten Gebiet antreffen. Sie bestimmt das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung, ist wesentlich für die Topographie

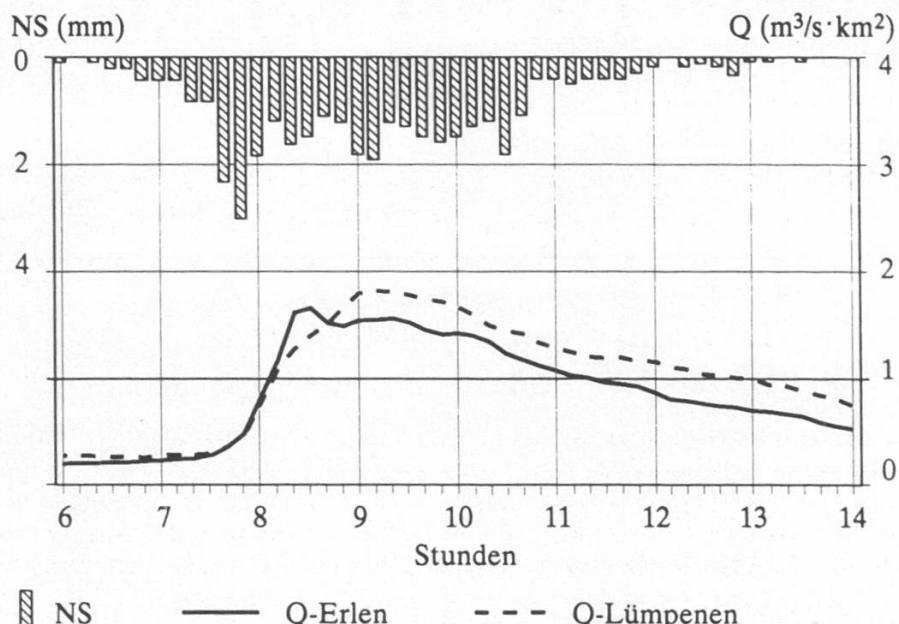
verantwortlich und bestimmt zusammen mit Klima und Vegetation die wichtigsten Gebietseigenschaften.

Der zeitliche Verlauf des Abflusses (Hochwasserganglinie) wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Die genauere Betrachtung eines Ereignisses, das bei gleichem Niederschlag und gleicher Vorgeschichte (Trockenheit) völlig unterschiedliche Hochwasserganglinien bewirkte, bestätigt den eigenwilligen Charakter von Einzugsgebieten (*Abbildung 4*). Andererseits kann aber festgestellt werden, dass bei anhaltend nasser Witterung die Einzugsgebiete viel ähnlicher reagieren und die Gebietseigenschaften offensichtlich eine immer kleinere Rolle spielen (*Abbildung 5*). Neben der Vorgeschichte ist auch die Niederschlagsintensität von grosser Bedeutung (*Abbildung 6*).

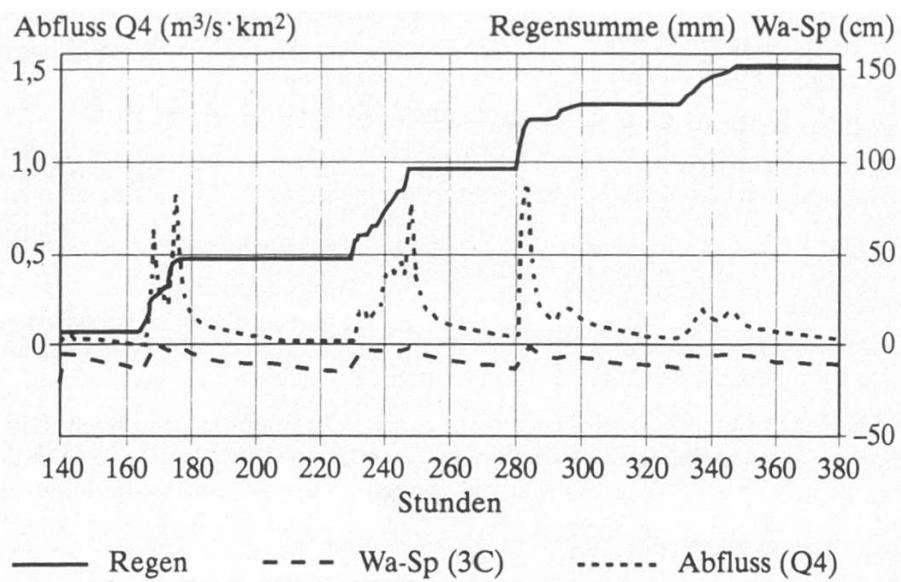
## 2.2 Prognose

Immer wieder werden Versuche unternommen, mittels charakteristischen Parametern des Einzugsgebietes die Hochwasserspitzen zu schätzen. Bis her ist dies aber noch nicht zufriedenstellend gelungen. Die Berücksichtigung der regionalen Starkniederschlags-Verhältnisse (Hydrologischer Atlas der Schweiz, 1992) hat wesentlich zur Verbesserung der Hochwasserschätzmethoden beigetragen (*Kölla, 1986*).

Eine realistische quantitative Prognose für Hochwasser bzw. für Geschiebetransport kann nur gemacht werden, wenn die oben beschriebenen



*Abbildung 5.* Niederschlagsereignis vom 4. Juni 1986 im Alptal (Kanton Schwyz): In der Vorwoche fielen bereits 180 mm Niederschlag. Der Niederschlag (NS) vom 4. Juni 1986 fiel somit auf einen bereits feucht-nassen Boden. Dieser vermochte in beiden Gebieten gleich wenig Wasser aufzunehmen, so dass sehr ähnliche Abflussganglinien ( $Q = f[t]$ ) zustande kamen.



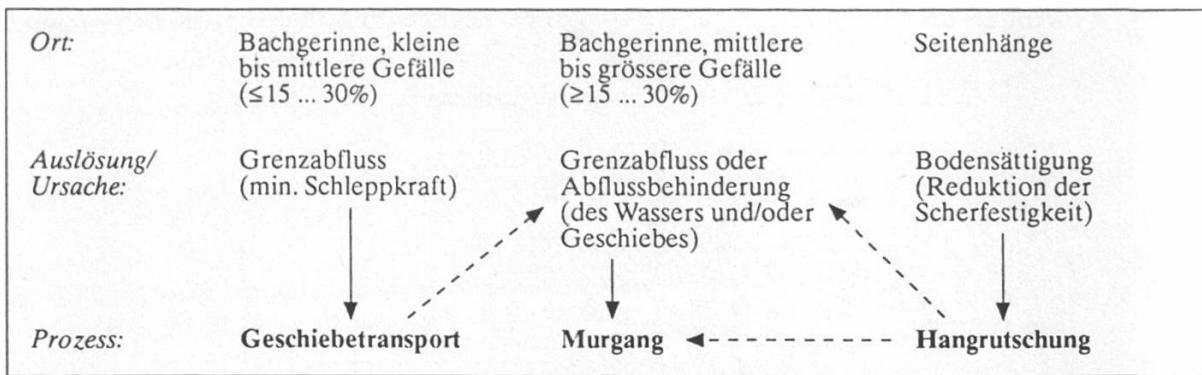
*Abbildung 6.* Der Verlauf der Abflussganglinie ( $Q = f[t]$ ), des Wasserspiegels im Boden (Wa-Sp) und der Niederschlags-Summenkurve einer 10tägigen Sommerperiode im Alptal. Der Wasserspiegel im Boden repräsentiert die Vorgeschichte recht gut. Für die Entstehung einer Abfluss spitze ist neben der Vorgeschichte und der Niederschlagssumme vor allem auch die Niederschlagsintensität von Bedeutung.

Prozesse quantifiziert werden können. Heute genügt für die Dimensionierung und die Planung von Schutzmassnahmen eine Abschätzung des Spitzenabflusses nicht mehr in jedem Fall. Man benötigt oft differenzierte Angaben, meist in Form einer möglichst gut geschätzten Hochwasserganglinie, die auch über den zeitlichen Verlauf der Hochwasserwelle und deren Volumen Auskunft gibt. Angaben über wahrscheinliche Hochwasserganglinien sind auch eine Voraussetzung zur Abschätzung der Geschiebe-Transportkapazität eines Gerinnes und damit für die Abschätzung der zu erwartenden Geschiebefracht während eines Hochwasserereignisses.

Die Forschung will Modelle benutzen, die durch messbare und physikalisch interpretierbare Parameter gesteuert werden. Damit könnte nämlich auch der Einfluss von veränderten Umweltbedingungen auf das entsprechende Hochwassergeschehen abgeschätzt werden.

### 3. Feststofftransport

Die bei einem Hochwasserereignis auftretenden, wesentlichen Prozesse der Geschiebeverfrachtung im gerinnenahen Bereich sind vereinfacht in *Abbildung 7* dargestellt. Diese Vorgänge stellen eine potentielle Gefährdung dar, weil in kurzer Zeit relativ grosse Feststoffmengen verfrachtet werden. Nachfolgend werden der Geschiebetransport und die Murgänge, die wichtigsten Prozesse im Gerinne, behandelt.



*Abbildung 7.* Die wesentlichen Geschiebelieferungsprozesse in einem Wildbach. Die Zuordnung von Gefällsbereichen ist als genereller Hinweis zu verstehen. Mit Murgängen werden meistens erheblich mehr Feststoffe zum Kegelhals gebracht als mit «normalem» Geschiebetransport.

### 3.1 Geschiebetransport

Wird in den Bachgerinnen ein minimaler Abfluss (Grenzabfluss) überschritten, so ist die Schleppkraft genügend gross, um Geschiebekörper aus der Sohle des Bachbettes in Bewegung zu setzen: Es findet Geschiebetransport statt. Mit zunehmendem Gefälle des Gerinnes wird die Mobilisierung des Geschiebes erleichtert, da die hangparallele Komponente der Schwerkraft die Schleppkraft unterstützt. So beträgt zum Beispiel der Grenzabfluss bei einem Gefälle von 20 % nur noch etwa die Hälfte des Grenzabflusses bei 10 % Gefälle.

Mit zunehmendem Gefälle steigt das Geschiebetransportvermögen stark an. So kann bei einer Verdoppelung des Gefälles bei gleichem Abfluss etwa drei bis vier Mal mehr Geschiebe transportiert werden (Rickenmann, 1990). Die in Laborversuchen gemessenen hohen Geschiebekonzentrationen im Abfluss (bis zu 30 Volumenprozent [Rickenmann, 1990]) werden in der Natur nur bei extremen Hochwassern oder murgangartigen Abflüssen erreicht. Denn die unregelmässige Gerinnegeometrie, die breite Kornverteilung des Sohlenmaterials sowie allenfalls herumliegendes Wildholz haben zur Folge, dass im natürlichen Wildbachgerinne viel grössere Energieverluste auftreten als unter den vereinfachten Laborbedingungen. Diese Unregelmässigkeiten führen auch dazu, dass der Geschiebetransport während eines Hochwasserereignisses sehr stark variiert. Es besteht deshalb auch keine direkte Abhängigkeit vom momentanen Abfluss (*Abbildung 8*).

Erst wenn man den Mittelwert der ständig fluktuiierenden Geschiebetransportraten über ein ganzes Ereignis berechnet (Rickenmann, 1992), ergibt sich ein Zusammenhang mit dem gesamten abgeflossenen Wasservolumen (*Abbildung 9*). Die kontinuierlichen Messungen seit 1986 im Erlenbach-Versuchsgebiet der WSL zeigen, dass bei gleicher Wasserfracht unter winterlichen Bedingungen weniger Geschiebe transportiert wird als im Sommer. Die

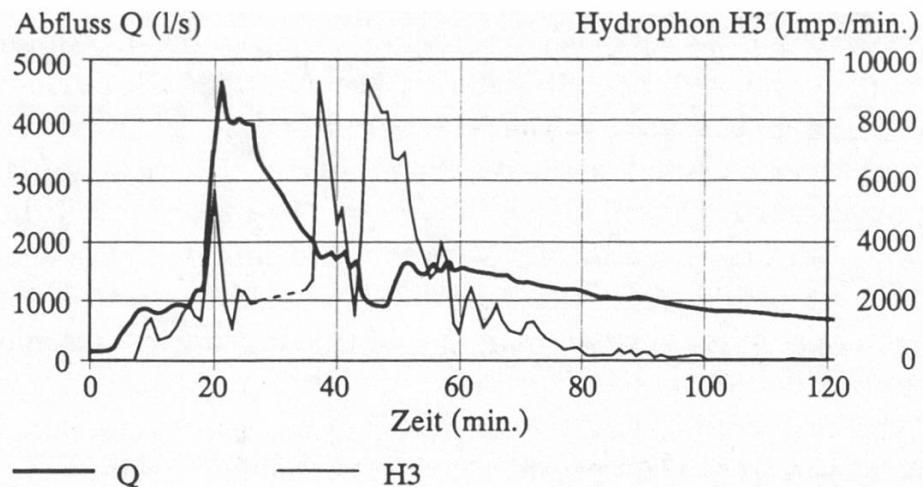


Abbildung 8. Abfluss (Q) und Geschiebetransport (Hydrophon H3) im Erlenbach (Alptal, Kanton Schwyz) beim Hochwasserereignis vom 21. August 1992. Die Hydrophone registrieren die Schläge des über eine Metallplatte laufenden Geschiebes. Diese Messungen, hier ausgedrückt in Anzahl Impulsen pro Minute für den Sensor H3, sind ein Mass dafür, wieviel Geschiebe pro Zeit-einheit durch den Messquerschnitt transportiert wird.

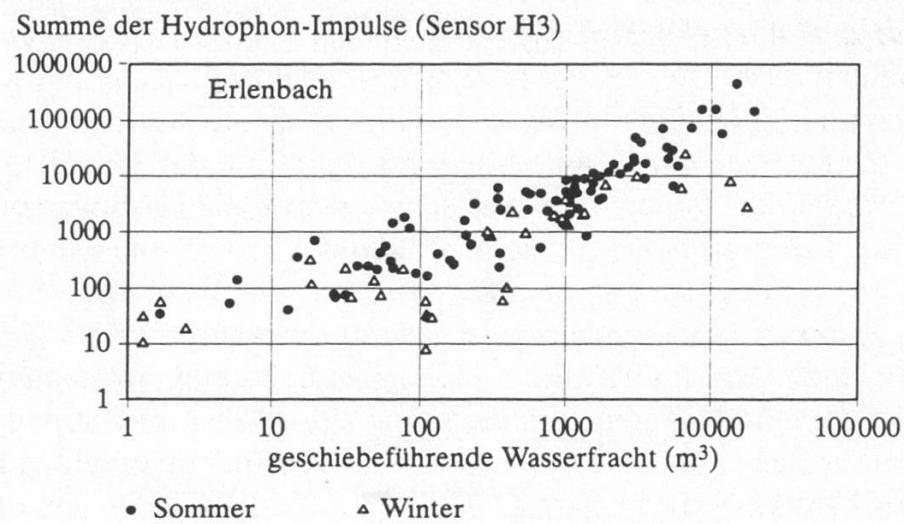


Abbildung 9. Geschiebetransportmessungen im Erlenbach für die Periode 1987 bis 1991. Die Punkte repräsentieren einzelne Hochwasserereignisse. Die Wasserfracht wurde für die Zeit von Geschiebetriebbeginn bis zu dessen Ende berechnet. Die Summe der Hydrophonimpulse ist ein Mass für die pro Ereignis transportierte Geschiebemenge. Auffällig ist der Unterschied zwischen sommerlichen und winterlichen Verhältnissen.

Mittelung über die ganze Hochwasserdauer ergibt Geschiebekonzentrationen im Bereich von wenigen Prozenten (ausgedrückt in Volumenanteilen der Wasserfracht) für «normalen» Geschiebetransport in Wildbächen. Die Erosionstiefen über längere Bachstrecken gemittelt sind meistens kleiner als etwa 1 bis 2 m. Da beim Schwemmkegel oder bei der Einmündung in den Talfluss (Vorfluter) oft ein deutlicher Knick des Gefälles vorhanden ist, nimmt dort die Transportkapazität stark ab, und das Geschiebe beginnt sich abzulagern.

Als Beispiel sei das Hochwasserereignis im Erlenbach (Alptal, Kanton Schwyz) vom 21. August 1992 angeführt (*Abbildung 8*). Bei einem Spitzenabfluss von über  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  und einer geschiebeführenden Hochwasserdauer von etwa 3 Stunden wurde eine Wasserfracht von rund  $11\,000 \text{ m}^3$  abgeführt. Die im Sammler abgelagerte Geschiebefracht betrug  $180 \text{ m}^3$ . Ein Teil dieser Feststoffe (Sand, Silt, Ton) wurde als Schwebstoffe aus dem Bachgerinne abtransportiert. Im Mittel ergibt sich eine Geschiebekonzentration von weniger als 1 Volumenprozent. Verteilt man die abtransportierte Geschiebemenge über die untersten 500 m des Gerinnes, in welchem Abschnitt nachträglich morphologische Veränderungen sichtbar waren, so ergibt sich bei einer mittleren Bachbreite von 2,5 m eine durchschnittliche Erosionstiefe von etwa 15 cm. Es muss zudem angenommen werden, dass in diesem Abschnitt auch von weiter oben zugeführtes Geschiebe abgelagert wurde. Nach dem Ereignis konnte denn auch keine deutliche Eintiefung (grösser als etwa 0,5 m) der mittleren Sohlenlage beobachtet werden; lokal waren jedoch deutliche Veränderungen der Sohlenmorphologie festzustellen.

Die Vorgeschichte spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Hangrutschungen, die Feststoffe ins Gerinne eintragen können, hängen wesentlich von den Vorfeuchtebedingungen und der Bodensättigung ab. Bezuglich der Geschiebetransportprozesse im Gerinne sind meistens nicht die letzten Stunden oder Tage entscheidend, wie beim Abflussprozess, sondern die letzten Monate bis Jahrzehnte vor dem Ereignis. Jedes geschiebeführende Hochwasser lagert die verfügbaren Feststoffe um. Je nach Ort und Grösse von Räumen, die Geschiebe zurückhalten, kann dann eine grössere Feststoffmenge schon beim nächsten Hochwasser, oder auch erst viel später, bis zum Kegel gelangen. Wesentlich ist auch, ob das Gerinne für Erosion anfällig ist. Langjährige Messungen von Geschiebefrachten deuten darauf hin, dass im Rappengraben nach dem Durchgang eines Murgangs grössere Geschiebemengen transportiert wurden als in den Jahren zuvor (*Abbildung 10*). Im weiteren wird der Geschiebehaushalt auch stark von Geschiebeanhäufungen hinter Wildholz sowie von der Rutschungsaktivität der Bachufer beeinflusst; diese beiden Faktoren können sich auch zwischen den Hochwasserereignissen verändern.

### 3.2 Murgänge

Bei Murgängen bewegt sich das Wasser- und Feststoffgemisch in der Form einer Geröllawine talwärts, wobei der Geschiebeanteil wesentlich grösser ist als beim Geschiebetransport durch Hochwasser. Eng mit dem Murgangprozess verbunden ist auch die Hangrutschung (siehe auch *Abbildung 7*). Bei beiden Prozessen spielt die Bodensättigung eine entscheidende Rolle. Theoretische Überlegungen zeigen, dass nichtbindiges Lockermaterial in einem Bachbett oder an einem Hang etwa ab einem Grenzgefälle von 27 % bei

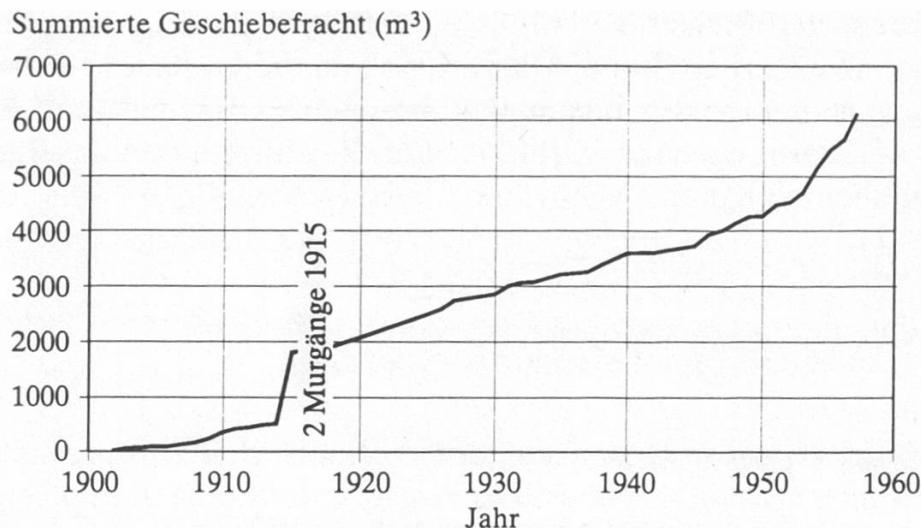


Abbildung 10. Langjährige Geschiebefracht-Messungen für den Rappengraben (Emmental, Kanton Bern). Nach dem Auftreten von zwei Murgangereignissen im Jahre 1915 ist die jährliche Geschiebelieferung höher als vorher. Auch nach der Mitte der 50er Jahre, mit zwei Hochwasser-Spitzen grösser als  $4 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$  (vgl. Abbildung 1), ist ein analoger Trend festzustellen. Dies lässt vermuten, dass das Bachgerinne nach grösseren Ereignissen destabilisiert und damit anfälliger für Erosion und Geschiebetransport ist.

voller Sättigung in Bewegung geraten kann (Takahashi, 1978). Bei einer zusätzlichen Belastung durch abfliessendes Wasser oder Geschiebe kann eine Mobilisierung des Materials auch bei kleineren Gefällen erfolgen. In Bachgerinnen werden Murgänge meist erst bei Gefällen von mindestens 20 % oder mehr ausgelöst (Haeberli et al., 1991). Murgänge können auch als Folge einer Abflussbehinderung (Verklausung) an Engstellen im Gerinne entstehen. Eine ins Bachbett gelangende Rutschmasse kann sich im Gerinne, wenn die Masse genügend schnell rutscht, ebenfalls zum Murgang ausbilden. Es ist weiter möglich, dass das abgerutschte Material zuerst im Gerinne liegenbleibt und den Geschiebetransport sowie den Wasserabfluss behindert. Wenn der Druck des Wassers und des Geschiebes genügend gross wird, können diese Schuttmassen mobilisiert werden, und so kann mit einer gewissen Verzögerung ebenfalls ein Murgang entstehen.

Der Abfluss eines Murgangs erfolgt meist in einem oder mehreren Schüben. Ähnlich den Schneelawinen bildet sich eine deutliche Front, an der sich die grössten Blöcke ansammeln. Die Höhe dieser «Geschiebewand» (so beschreiben Augenzeugen das Herannahen eines Murgangs) kann bis zu mehreren Metern betragen. Im vordersten Teil der Murgangwelle beträgt der Anteil an Feststoffen häufig zwischen 40 bis 60 Volumenprozent. Die Murgangwelle kann von ihrem Entstehungspunkt bis zum Ablagerungskegel Material aufnehmen und anwachsen. Der grösste Abfluss an der Front ist häufig mindestens eine Größenordnung höher als der entsprechende Hochwasser-Spitzenabfluss des gleichen Niederschlagsereignisses (VAW, 1992). Bei

unverbauten, natürlichen Verhältnissen erfolgt die Ablagerung eines Murgangs zu einem grossen Teil auf dem Kegel, da die Geschiebetransportkapazität des Vorfluters meist ungenügend ist und das Bachbett auf dem Kegel schnell mit Geröllmassen aufgefüllt ist. Die Reichweite der einzelnen Schübe hängt vor allem von deren Masse und Fliessgeschwindigkeit ab.

## 4. Rolle der Vegetation

Die Vegetation wirkt sich auf das Abflussverhalten einerseits indirekt durch die Verdunstung aus, andererseits ganz unmittelbar, indem sie das Infiltrationsvermögen durch die Durchwurzelung der obersten Bodenschicht erhöht. Diese mechanische Stabilisierung der obersten Bodenschicht reduziert die Anfälligkeit für Hangrutschungen und somit den Feststoffeintrag ins Gerinne.

### 4.1 Einfluss auf die Abflussbildung

Der Wald verbraucht im Vergleich zu anderen Vegetationsdecken viel Wasser durch Verdunstung. Folgende Verdunstungskomponenten sind daran beteiligt:

- Interzeptionsverdunstung
- Transpiration
- Evaporation von Bodenwasser
- Evaporation der Schneedecke

Dabei spielen die Evaporation von Bodenwasser und von der Schneedecke im Wald eine untergeordnete Rolle.

Die Interzeptionsverdunstung ist neben der Häufigkeit und der Intensität der Niederschläge direkt vom Überschirmungsgrad des Waldbestandes abhängig. Je mehr Blätter, Nadeln und Zweige vorhanden sind, das heisst, je grösser die Gesamtoberfläche der oberirdischen Biomasse eines Waldbestandes ist, desto grösser sind auch die Interzeptionsverluste durch Verdunstung von Wasser an der Oberfläche der benetzten Pflanzenteile (etwa 1 bis 3 mm pro Ereignis). Da bei Hochwasserereignissen Regenmengen von meist über 30 oder 40 mm fallen, ist dieser durch Interzeption zurückgehaltene Niederschlag für den Ablauf des Ereignisses selber unwesentlich. Wenn wir hingegen die Interzeptionswirkung einer ganzen Zeitperiode von Tagen und Wochen betrachten, erreichen bei zum Beispiel 20 mittleren Regenfällen etwa 20 bis 60 mm Wasser den Waldboden gar nicht. Folgt dann ein Starkregen, kann der Waldboden vorübergehend mehr Wasser speichern.

Die Transpiration ist sehr schwierig zu beurteilen, weil wir heute wissen, dass nicht alle Blätter und Nadeln eines Baumes gleich viel transpirieren. Die Transpirationsverluste sind also nicht proportional zur Blatt- und Nadelmasse eines Baumes. Faktoren wie Blatt- und Nadelalter, Licht- oder Schattenkrone, Baumalter, Nährstoff- und Wasserversorgung im Boden, Jahreszeit und Luftqualität spielen hier eine Rolle, die im Einzelnen noch zu wenig bekannt ist. Die Transpiration kann in einem Waldboden, je nach Voraussetzung, an Sommertagen 4 bis 6 mm pro Tag betragen. Im Vergleich zur Evaporation von

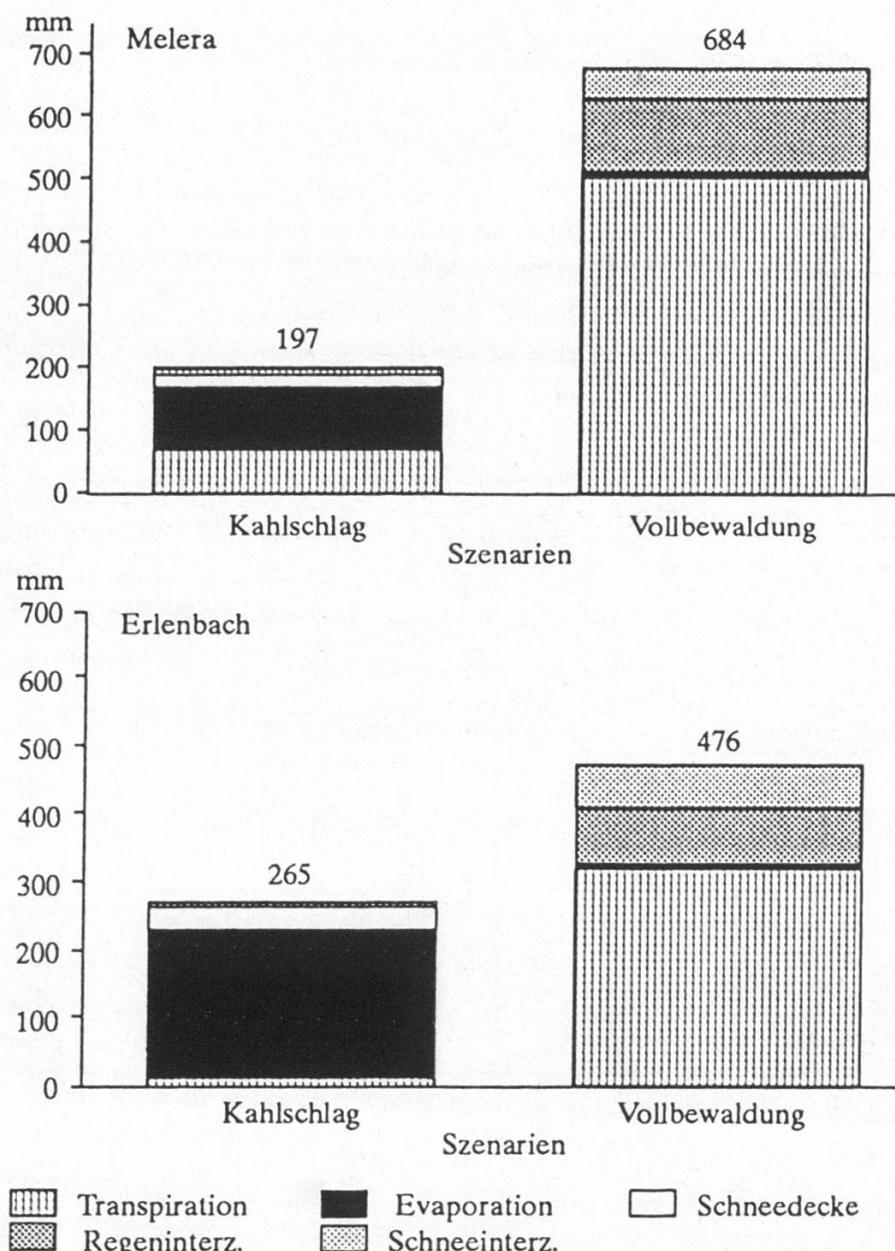


Abbildung 11. Vergleich der modellierten, mittleren Verdunstungskomponenten in den beiden bezüglich Bodenverhältnissen unterschiedlichen Einzugsgebieten Melera (tiefgründig, gute Durchlässigkeit) und Erlenbach (flachgründig, stark gehemmte Durchlässigkeit) für die Szenarien «Kahlschlag» und «Vollbewaldung». Für beide Szenarien wurde dasselbe Wetter als Modellinput verwendet.

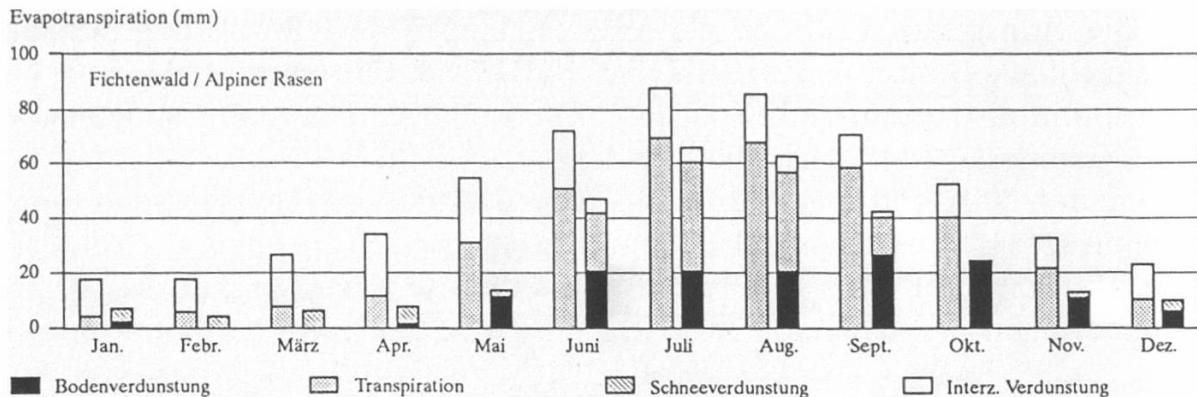


Abbildung 12. Die pro Monat berechneten mittleren Verdunstungswerte (Evapotranspiration) für Fichtenwald und Alpinen Rasen an der südexponierten Urserentalflanke.

Bodenwasser oder Interceptionsverlusten handelt es sich hier um wesentlich grössere Wassermengen, die bei gut transpirierenden Waldbeständen dem Boden entzogen werden. Der Wasserentzug durch die Vegetationsdecke spielt also für die Dämpfung eines Starkniederschlagsereignisses eine bedeutende Rolle. Auf Niederschlag-/Abflussdaten abgestützte Simulationsrechnungen haben interessante Ergebnisse gezeigt (Abbildungen 11, 12, 13) (Forster, 1992).

Die Vegetation kann das Abflussverhalten bei Starkniederschlägen wie bereits erwähnt auch ganz direkt beeinflussen. Mit Beregnungsversuchen in Bergwäldern der Bayerischen Alpen versuchte man genauere Kenntnisse über das Abflussverhalten in Gebirgswäldern zu erlangen (Bunza und Schauer, 1989). Ein wichtiges Resultat bestand darin, dass in Bergmischwäldern und

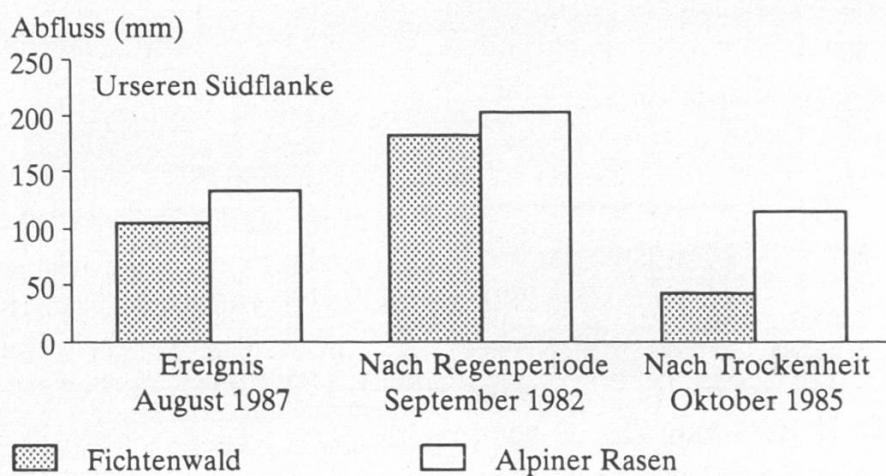


Abbildung 13. Modellierte Abflussmengen aufgrund eines Unwetters im August 1987 im Urserental für verschiedene Witterungsphasen und unterschiedliche Vegetation. Hätte sich das Ereignis (in drei Tagen fielen 270 mm Niederschlag) im September 1982 (Regenperiode) ereignet, hätte das dreitägige Abflussvolumen gegenüber der Situation im August 1987, je nach Vegetation, um 50 bis 75 % zugenommen. Wäre der gleiche Niederschlag hingegen im Oktober 1985 (Trockenheit) gefallen, hätte sich das 3tägige Abflussvolumen nur gerade unter einem Fichtenbestand deutlich (rund 50 %) vermindert. (Die Berechnungen beziehen sich auf die südexponierte Talflanke des Urserentales.)

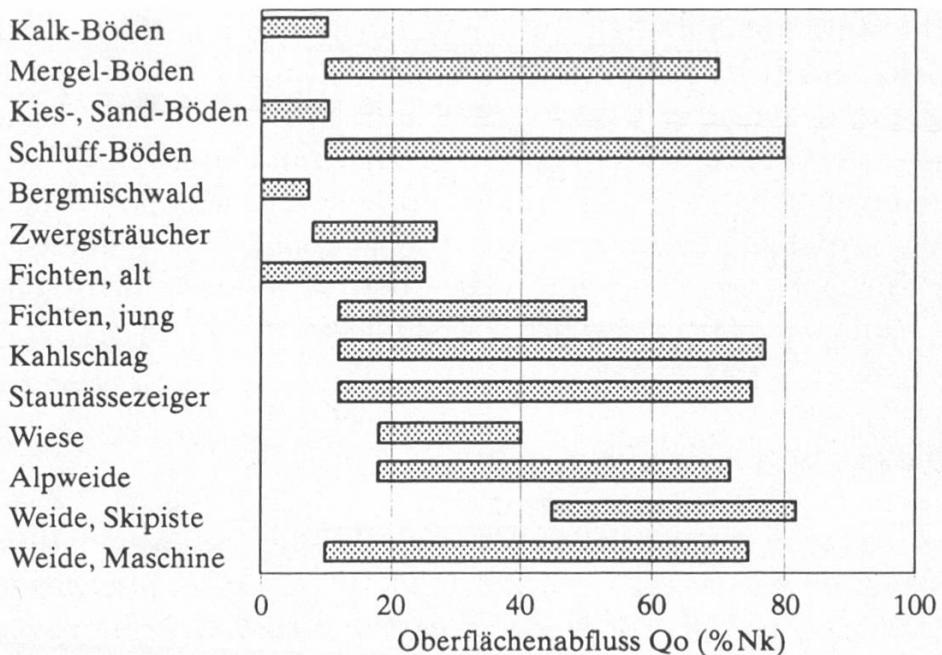


Abbildung 14. Entstehung von Oberflächenabfluss (Qo) bei einem künstlichen Starkregen (Nk) von rund 100 mm/h in Bergwäldern von Wildbach-Einzugsgebieten der Bayerischen Alpen in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften, Vegetation und Nutzung (nach Bunza und Schauer, 1989).

Fichtenaltbeständen mit gut ausgebildeter Strauch- und Krautschicht selbst auf schluffig-tonigen Standorten nie Oberflächenabfluss festgestellt wurde, falls keine auf Vernässung oder Verdichtung hinweisende Zeigerpflanzen vorhanden waren. Hier wirkten die gute Durchwurzelung und das dadurch bedingte grosse Porenvolumen ein hohes Infiltrationsvermögen.

Hingegen betrug der Oberflächenabfluss bis 50 % des Beregnungswassers und mehr auf Schluffböden mit mittlerem und hohem Tongehalt, auf Waldflächen mit fehlendem Unterwuchs, im Fichtenjungwald oder in erlenreichen Gehölzbeständen.

Wie Abbildung 14 zeigt, wirkt sich neben der Vegetation und Bodenbeschaffenheit auch die Waldbewirtschaftung und -nutzung auf das Abflussverhalten aus.

Der Wald beeinflusst durch seine Interzeptionswirkung die Schneedecke. Der Schneedeckenspeicher wird im Winter – ähnlich dem Netto-Niederschlag im Sommer – mit abnehmender Überschirmung zunehmen. Je grösser dieser Speicher ist, desto mehr Schmelzwasser wird im Frühling abfliessen. Die Bildung von Hochwasser ist dann mit Risiken behaftet, wenn das ganze Einzugsgebiet wassergesättigt ist und grosse Niederschläge fallen. Bildet sich in einem Gebiet eine gleichmässige Schneedecke, die gleichzeitig schmilzt und die Böden sättigt, ist das Hochwasserrisiko während dieser Zeit erhöht. Ist hingegen wegen unterschiedlicher Bewaldung die Schneedecke ungleich mächtig und schmilzt sie im Frühjahr nicht überall gleich schnell, entstehen über das Einzugsgebiet verteilt Orte erhöhter Wasserspeicherkapazität.

Welches sind nun die Grenzen der Waldwirkungen auf den Hochwasserabfluss? Der Effekt ist dann minimal, wenn wegen der Witterung vor einem Hochwasserereignis bereits alle verfügbaren Speicher in der Vegetationsdecke, der Schneedecke und im Boden gefüllt sind. Umgekehrt sind die Wirkungen dann maximal, wenn in der Zeit vor dem Ereignis sämtliche Speicher grösste Wasserdefizite aufweisen. Es hat sich gezeigt, dass die meisten Hochwasser in Waldgebieten dann stattfinden, wenn die Niederschlagsmenge die im Moment verfügbaren Wasserspeicher weit übertrifft.

#### 4.2 Einfluss auf den Feststofftransport

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Wirkung der Vegetation auf die Geschiebelieferungsprozesse (VAW/EAFV, 1988). Die Schutzwirkung einer Vegetationsdecke vor Oberflächenerosion ist bekannt. Begrünungs- und Aufforstungsmassnahmen wurden schon zu Beginn dieses Jahrhunderts durchgeführt. Bereits nach wenigen Jahren entwickelt sich auf einer kahlen Hangfläche eine schützende Pflanzendecke, die das Abschwemmen des Lockermaterials verhindert oder zumindest erschwert. Bis zum Einsetzen eines weitergehenden Schutzes muss allerdings mit Jahrzehnten gerechnet werden (Böll, 1986; Abe und Ziemer, 1991).

Betrachtet man ganze Hangrutschungen, so ist eine stabilisierende Wirkung der Wurzeln gegeben, wenn der potentielle Gleithorizont innerhalb der durchwurzelten Schicht liegt und diese nicht tiefer als etwa 1 m reicht (Tsukamoto und Minematsu, 1987). Bei tiefergründigen Rutschungen kann eine Vegetationsdecke allenfalls durch Verminderung des versickernden Wassers eine günstige Wirkung ausüben, indem die Bodensättigung verzögert wird, die wesentlich ist für die Ausbildung von Gleitflächen. Doch kann sich die Auflast durch Bäume in potentiellen Rutschgebieten ungünstig auswirken, weil das Gewicht des Holzes zu einer wesentlichen Erhöhung der Gesamtbelastung eines Rutschpaketes führen kann. Im WSL-Versuchseinzugsgebiet Erlenbach zum Beispiel sind in den Bacheinhängen viele bewaldete Hangpartien zu beobachten, die gegen das Gerinne hin kriechen oder rutschen. Die flysch-reichen Böden sind stark vernässt und der Gleithorizont liegt im Bereich 0,5 bis etwa 1 m, tiefer als das flachgründige Wurzelsystem. Interessant ist auch eine Beobachtung aus dem mittleren Inntal in Österreich, wo nach der Unwetterkatastrophe von 1985 im Wiesland mehr als doppelt so viele Hanganbrüche gezählt wurden als in den bewaldeten Gebieten (Moser und Schoger, 1989).

Nicht zuletzt muss auch die Wirkung von im Gerinne herumliegendem Wildholz beachtet werden. Die grösseren Baumstämme bilden oft Hindernisse für den Abtransport des Geschiebes und verstärken die Tendenz zur Bildung eines treppenförmigen Längsprofiles. Wird bei einem mittleren oder grösseren Hochwasser eine solche natürliche Sperre umspült oder zerstört, so kön-

nen beträchtliche Geschiebemengen freigesetzt werden. Im Extremfall kann es während eines Hochwasserereignisses auch zu einer Verklausung mit nachfolgend murgangartigem Abfluss kommen.

## **5. Zusammenfassende Beurteilung und Ausblick**

Die bisherigen Untersuchungen weisen auf die wichtige Bedeutung der Bodeneigenschaften sowie der Vegetation für die Hochwasserbildung und den Feststofftransport hin. Der Boden bestimmt die Durchlässigkeit und die Speicherfähigkeit; erst bei voller Sättigung oder bei sehr intensiven Regenfällen kommt es zu raschem Oberflächenabfluss. Die Vegetation, das heißt insbesondere der Wald, kann bei anhaltender trockener Witterung vor dem Hochwasser das Speichervermögen entscheidend erhöhen. Beim Geschiebe-transport ist nach Überschreiten des Grenzabflusses vor allem die Hochwasserfracht für die während des Ereignisses transportierte Feststoffmenge massgebend. Für die Bildung von Murgängen muss einerseits genügend Lockermaterial und ein minimales Gefälle vorhanden sein, andererseits muss dieses Material wassergesättigt sein.

Die Rolle der Vorgeschichte und die Art des Niederschlages sind nicht nur für die Abschätzung der Abflussspitze, sondern auch für den Verlauf einer Hochwasserganglinie von Bedeutung. Die Kenntnis der Ganglinie, der Hochwasser- und der Geschiebefracht eines Ereignisses ist wichtig für die Planung von Hochwasserschutzmassnahmen (zum Beispiel Sperrendimensionierung, Rückhaltebecken, Überflutungsflächen, Geschiebesammler). Dabei könnten Modelle, die durch messbare und physikalisch interpretierbare Parameter gesteuert werden, eine wertvolle Hilfe darstellen.

Bezüglich des Feststofftransports sind vor allem zwei Problemkreise noch zu wenig erforscht: Bei wie steilem Gerinne und bei welchen Abflüssen gerät ein Teil des Bachbettes derart in Bewegung, dass daraus ein Murgang entsteht und ein «normaler» Geschiebe-transport praktisch nicht mehr möglich ist? Wildholz, das im Gerinne herumliegt, behindert generell den Feststofftransport. Bei starkem Geschiebe-transport oder bei einem Murgang könnten solche Hindernisse einerseits bremsend oder rückstauend wirken, andererseits könnten solche Geschiebeanhäufungen auch eine Vergrößerung der Murgangfront bewirken. Wildholz im Gerinne verstärkt die Tendenz eines Wildbaches zur Bildung eines treppenartigen Längsprofils. Es ist zu untersuchen, inwieweit dadurch der Grenzabfluss für intensiven Feststofftransport erhöht wird und so nach Überschreiten dieses Schwellenwertes mit umso extremeren Geschiebeverfrachtungen gerechnet werden muss.

Was bedeuten diese zum Teil noch sehr lückenhaften Prozesskenntnisse für die Forschung und die Praxis? Die Witterung müssen wir hinnehmen wie

sie ist. Dasselbe gilt auch für die topographischen Verhältnisse im Einzugsgebiet und die generellen Bodenverhältnisse. Diese sind nur langsam und in beschränktem Masse und am ehesten durch Bewirtschaftung zu beeinflussen (zum Beispiel waldbauliche und die Bodenbildung fördernde Massnahmen).

Es ist deshalb leicht zu verstehen, dass das Verständnis für die Prozesse der wichtigste Ausgangspunkt für das Ergreifen von wirkungsvollen Massnahmen ist. Sind einmal Massnahmen ergriffen, geht es darum, das Ausmass ihrer Wirkung zu bestimmen, um den Erfolg oder Misserfolg möglichst frühzeitig zu erkennen.

## Résumé

### Les crues

La formation d'une crue et le charriage sont étroitement liés aux conditions météorologiques, aux derniers événements climatiques et à la topographie du bassin-versant. Mais les propriétés du sol et la couverture végétale revêtent également une importance particulière. Durant des périodes climatiques plus sèches que d'habitude, la végétation augmente largement la capacité de rétention hydrique du sol. Une crue ne peut se former et charrier des matériaux que sur un sol complètement saturé ou sous des pluies très intenses. L'eau de ruissellement se déverse alors rapidement dans le lit du cours d'eau. Le débit, la déclivité du lit du torrent et la présence de matériaux meubles sont des éléments décisifs dans le processus de charriage.

Cet article présente des exemples illustrant les conditions qui déterminent la formation des crues dans les torrents, du charriage et des laves torrentielles. On y trouve aussi une évaluation du rôle de la forêt. La connaissance de ces processus revêt une importance majeure car elle est à la base de l'efficacité des mesures visant à diminuer ces dangers naturels.

Traduction: *Monique Dousse*

## Literatur

- ASF (Amt für Strassen- und Flussbau) 1974: Die grössten bis zum Jahre 1969 beobachteten Abflussmengen von schweizerischen Gewässern.
- Abe, K.; Ziemer, R., 1991: Effect of tree roots on shallow-seated landslides. USDA For. serv., gen. tech. rep. PSW-GTR-130: 11–20.
- Böll, A., 1986: Schutzwald und Rutschungsstabilität. Neue Zürcher Zeitung Nr. 23, 29. Jan. 1986.
- Bunza, G.; Schauer, T., 1989: Der Einfluss von Vegetation, Geologie und Nutzung auf den Oberflächenabfluss bei künstlichen Starkregen in Wildbachgebieten der Bayerischen Alpen. Informationsbericht 2/89 des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, München. S. 127–150.
- Forster, F., 1992: Anwendungen und Erfahrungen mit dem Simulationsmodell BROOK. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Interner Hydrologiebericht B349.1.
- Haeberli, W.; Rickenmann, D.; Rösli, U.; Zimmermann, M., 1991: Murgänge 1987: Dokumentation und Analyse. Mitteilungen des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4: 77–88.
- Hydrologischer Atlas der Schweiz, 1992. Bern, Landeshydrologie und -geologie. Tafel 2.4.
- Kölla, E., 1986: Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Eine Untersuchung über Zusammenhänge zwischen Gebietsparametern und Spitzenabflüssen kleiner Einzugsgebiete. Mitt. Vers.anst. Wasserbau Hydrol. Glaziol. Eidgenöss. Tech. Hochsch. Zür. 87: 163 S.
- LHG (Landeshydrologie und -geologie) 1986, 1988, 1991: Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern. Mitteilungen Nr. 7, 8, 16, 17.
- Moser, M.; Schoger, H., 1989: Die Analyse der Hangbewegungen im mittleren Inntal anlässlich der Unwetterkatastrophe 1985. Wildbach-Lawinenverbau 53, 110: 1–22.
- Rickenmann, D., 1990: Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitt. Vers.anst. Wasserbau Hydrol. Glaziol. Eidgenöss. Tech. Hochsch. Zür. 103: 249 S.
- Rickenmann, D., 1992: Bedload transport and discharge in the Erlenbach Stream. COMTAG Meeting and Workshop, Benediktbeuern, Germany (im Druck).
- Röthlisberger, G., 1991: Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. Ber. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 330: 122 S.
- Röthlisberger, G., 1992: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1991. Wasser energ. luft 84, 3/4: 37–41.
- Röthlisberger, G.; Keller, H.M., 1992: Historische Hochwasser in der Schweiz – Ursachen und jahreszeitliche Verteilung. Interpraevent Bern, Tagungspublikation Bd. 1: 105–116.
- Takahashi, T., 1978: Mechanical characteristics of debris flow. ASCE (American Society of Civil Engineers), J. Hydr. Div., Vol. 104, No. HY8, p. 1153–1169.
- Tsukamoto, Y.; Minematsu, H., 1987: Evaluation of the effect of deforestation on slope stability and its application to watershed management. Proc. Forest Hydrology and Watershed Management, Vancouver, IAHS Publ. No. 167: 181–189.
- VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidg. Technischen Hochschule Zürich) (Hrsg.) 1992: Murgänge 1987: Dokumentation und Analyse. Ber. Vers.anst. Wasserbau Hydrol. Glaziol. Eidgenöss. Tech. Hochsch. Zür. 97. 6: 620 S.
- VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidg. Technische Hochschule Zürich); EAFV (Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen Birmensdorf) (Hrsg.) 1988: Folgen der Waldschäden auf die Gebirgs gewässer in der Schweiz. Workshop 1987. Zürich, VAW; Birmensdorf, EAFV. 109 S.
- Zuidema, P., 1985: Hydraulik der Abflussbildung während Starkniederschlägen. Eine Untersuchung mit Hilfe numerischer Modelle unter Verwendung plausibler Bodenkennwerte. Mitt. Vers.anst. Wasserbau Hydrol. Glaziol. Eidgenöss. Tech. Hochsch. Zür. 79: 141 S.

Gedruckt mit Unterstützung der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.

Verfasser: Felix Forster, dipl. Bauing. ETH, Dr. Hans Martin Keller †, Dr. Dieter Rickenmann, Gerhard Röthlisberger, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), CH-8903 Birmensdorf.