

Zeitschrift: Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft Bern
Herausgeber: Geographische Gesellschaft Bern
Band: 59 (1996)

Artikel: Prozesse in Wildbächen : ein Beitrag zur Hochgebirgsforschung
Autor: Kienholz, Hans / Weingartner, Rolf / Hegg, Christoph
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-960443>

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: 26.01.2026

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

Prozesse in Wildbächen – ein Beitrag zur Hochgebirgsforschung

Hans Kienholz, Rolf Weingartner, Christoph Hegg

Zusammenfassung

Die hydrologischen und geomorphologischen Prozesse in Wildbächen stellen keine einfachen Kausalketten dar, sondern sind Teile eines hochkomplexen Systems, das durch die Verhältnisse im Einzugsgebiet (Klima, Geologie, Vegetation usw.) bestimmt ist und das natürlichen (z.B. Klimänderungen) und vom Menschen induzierten Veränderungen (Landnutzung, Verkehrserschliessung, Wasserbauten usw.) unterliegt. Mögliche Klima- und Umweltveränderungen können die Bedingungen in einem Wildbacheinzugsgebiet so verändern, dass sich ihre Auswirkungen nicht mehr aus den in der Vergangenheit gewonnenen Erfahrungen abschätzen lassen, sondern gute Systemkenntnisse und zuverlässige Simulationsmodelle erfordern. Dazu sind wesentlich bessere Informationen über die beteiligten Prozesse und deren Wechselbeziehungen nötig, als dies heute der Fall ist. Aus diesem Grunde werden in Wildbach-Testgebieten detaillierte Untersuchungen durchgeführt und neue Messtechniken und Simulationsverfahren entwickelt. Als Beispiele werden Ergebnisse aus Simulationen der Abflussbildung und die Entwicklung eines Geschiebetracers dargestellt und diskutiert.

1. Einleitung

Wildbäche stellten schon immer eine grosse Bedrohung der menschlichen Existenz in den Alpentälern dar. Zeugnis davon liefern zahlreiche historische Dokumente, Beschreibungen und Sagen, die von den Verheerungen berichten, die ein Wildbach an diesem oder jenem Ort angerichtet habe.

Für die Vorgänge in einem Wildbacheinzugsgebiet sind die in den Hängen und im Gerinne fliessenden Wassermengen von zentraler Bedeutung. Gewitter, aber auch Dauerregen oder eine starke Schneeschmelze führen vielfach zu Hochwassersituationen. In den steilen Hängen und Gerinnen erodiert das oberflächlich abfliessende Wasser immer wieder erhebliche Gesteins- und Erdmassen, während versickertes und unterirdisch abfliessendes Wasser häufig zur Destabilisierung von Hängen beiträgt, so dass grosse Gesteins- und Erdmassen das Wildbachgerinne in Form von Rutschungen oder Hangmuren erreichen.

Diese Prozesse bedeuten Gefahr von Überschwemmungen, von Übermurungen und von Uferunterspülungen. Sie führen zur Gefährdung von Menschenleben, zur Zerstörung von Sachwerten oder zu Verkehrsbehinderungen. Die hydrologischen und geomorphologischen Prozesse stellen nicht eine einfache Kausalkette dar, son-

dern sind Teile eines hochkomplexen Systems, das durch die Verhältnisse im Einzugsgebiet (Klima, Geologie, Vegetation usw.) bestimmt ist und das natürlichen (z.B. Klimänderungen) und vom Menschen induzierten Veränderungen (Landnutzung, Verkehrserschliessung, Wasserbauten usw.) unterliegt.

2. Fragen

Bewusstes Umgehen mit Naturgefahren allgemein und mit den Wildbachgefahren im besonderen setzt voraus, dass die gefährlichen Prozesse bekannt sind und dass definiert ist, welche Risiken eingegangen werden dürfen und welche Mittel allenfalls zu deren Reduktion eingesetzt werden sollen und können.

«*Was kann passieren?*» ist die Frage, die sich bei der Beurteilung der Wildbachgefahren stellt. In der Praxis werden heute verschiedene empirische Ansätze und Verfahren zu einer groben Abschätzung der Wildbachgefahren eingesetzt. Weltweit befassen sich zahlreiche Forschungsinstitutionen intensiv mit der Verbesserung der Lösungsansätze. Dabei geht auch die Forschung oftmals sehr pragmatisch vor. Sie konzentriert sich vor allem auf diejenigen Aspekte, bei welchen erfolgversprechende Lösungen am ehesten in Aussicht stehen. Dies führt dazu, dass der Wissensstand in den verschiedenen, für den Charakter von Wildbächen relevanten Fragen sehr unterschiedlich ist.

Im Rahmen einer Vorstudie für das schweizerische Nationale Forschungsprogramm «Klimaänderungen und Naturkatastrophen» (NFP 31) haben die Autoren (KIENHOLZ, HEGG, 1993) neben zahlreichen weiteren Fragen folgende Themenbereiche als vordringlich und relevant für die Grundlagenforschung dargestellt:

1. *Abflussbildung - Bedeutung der Vorgeschichte:* Welchen Einfluss hat das Niederschlagsgeschehen (oder Trockenzeiten!) vor einem Hochwasserereignis auf den Zustand (Füllungsgrad) der verschiedenen Wasserspeicher im Einzugsgebiet (Boden, Grundwasser) und damit auf die Prozesse der Abflussbildung beim Hochwasserereignis?
2. *Feststofflieferung ins Gerinne:* Wann, unter welchen Umständen und durch welche Prozesse (diffuse Erosion, Rutschungen, Hangmuren usw.) gelangen Feststoffe aus dem Hang in die Wildbachgerinne?
3. *Transportvorgänge in Gerinnen:* Wie werden die Feststoffe, im Besonderen das grobe Geschiebe in steilen Wildbachgerinnen, mobilisiert und verlagert («normaler Geschiebetrieb», «Verkippen und kollerndes Verlagern grosser Blöcke», «Murgang»)? Wie werden diese Vorgänge gesteuert?
4. *Querschnittsveränderungen der Gerinne bei von Hochwasserereignissen:* Wie verändern sich die Sohlenlage und die Böschungen in einem Wildbachgerinne während eines Hochwassers?

Diese Fragen verdeutlichen, dass bis heute nur ungenügende Kenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den Gebiets- und Gerinne-Eigenschaften, dem Abfluss und den resultierenden Feststoff- bzw. Geschiebefrachten bestehen und dass zuverlässige Verfahren für deren Bestimmung weitgehend fehlen. Ein wesentlicher Teil

der Wildbachgefahren geht von grossen, plötzlich auftretenden Geschiebe- und Murenfrachten aus. Deshalb sind heutige und künftige Forschungsarbeiten schwergewichtig darauf auszurichten, die Prozesse, die zur Bildung hoher Geschiebefrachten beitragen, besser zu erkennen, besser zu verstehen und ihre Wirkungsweise soweit als möglich in Modellen abzubilden. Beitragen zu einer Verbesserung des Kenntnisstandes können Untersuchungen, die sich einerseits auf die einzelnen dominanten Prozesse konzentrieren und andererseits auf eine gesamtheitliche Erfassung von Wildbachsystemen ausgerichtet sind.

Solche Untersuchungen sind zwingend notwendig, wenn die Frage im Sinne von «*Was kann passieren, wenn...?*» gestellt wird. Was kann beispielsweise passieren, wenn die Bergwälder grossflächig krank werden, die Vitalität der Bäume abnimmt, das Wurzelgeflecht weniger dicht und robust ist?

Was kann in unseren Wildbachsystemen passieren, wenn sich die Klimasituation verändert? Diese Frage ist hochaktuell: Aufgrund von Klimasimulationen wird die Temperatur im Verlaufe des nächsten Jahrhunderts im globalen Mittel um 2 bis 3°C ansteigen mit entsprechenden Folgen auf das Klima. Erwartet werden nicht nur eine Veränderung der mittleren Temperatur- und Niederschlagswerte, sondern auch eine Zunahme der Variabilität des Witterungsverlaufes und damit ein «turbulenteres» Wettergeschehen (SCHÄDLER, 1990, SCHORER, 1992). Die Erhöhung der mittleren Temperaturen wird zu einer Anhebung der Höhenstufen führen. Das Zurückschmelzen der Gletscher und die Verschiebung der Permafrostuntergrenze als primäre Folgen werden – je nach örtlichen Gegebenheiten – erwiesenermassen zu einer Freilegung zusätzlicher leicht mobilisierbarer Schuttmassen führen. Das «turbulenter» Wettergeschehen wird sich jedoch auch in tieferen Lagen (von der alpinen bis hinunter in die colline Höhenstufe) auswirken. Bedingt durch die Dämpfungswirkung der Vegetation werden hier die Reaktionen wahrscheinlich träger ausfallen und in einer ersten Phase weniger offensichtlich sein. Um so mehr ist es die Aufgabe der Forschung, hier mittel- und langfristige Entwicklungen zu erkennen und aufzuzeigen.

Veränderungen im Klimageschehen bzw. in den Umweltbedingungen dürften die Häufigkeit und das Ausmass von Extremereignissen stark beeinflussen. Sie werden sich aber auch auf die Prozesse in den «ruhigen» Phasen zwischen den Ereignissen auswirken. Zu erwähnen sind in diesem Zusammenhang beispielsweise die Veränderungen bei den massgeblichen hydrologischen Speichern oder eine Intensivierung der Feststoffmobilisierung und -lieferung.

Mögliche Klima- und Umweltveränderungen können die Bedingungen in einem Wildbacheinzugsgebiet so verändern, dass sich ihre Auswirkungen nicht mehr aus den in der Vergangenheit gewonnenen Erfahrungen abschätzen lassen. Fragen im Sinne von «Was kann passieren, wenn?», können deshalb nur mit guten Systemkenntnissen und mit Hilfe von zuverlässigen physikalischen Modellen beantwortet werden. Dazu sind wesentlich bessere Informationen über die beteiligten Prozesse und deren Wechselbeziehungen nötig, als dies heute der Fall ist.

Dabei werden «passive» Experimente, das heisst die gründliche Beobachtung und Auswertung von natürlichen Ereignissen und deren Spuren, wo immer sie auch auftreten, nach wie vor einen sehr hohen Stellenwert haben. Wesentlich für den Aufbau eines besseren Systemverständnisses für Wildbachsysteme sind jedoch aktive, gezielt angesetzte Versuche im Labor und im Gelände.

3. Die Testgebiete Rotenbach und Spissibach

Im Hinblick auf die Klärung der im vorangehenden Kapitel aufgeworfenen Fragen führen die Gruppen für Hydrologie und Geomorphologie des Geographischen Instituts der Universität Bern Untersuchungen in den wildbachkundlichen Testgebieten Rotenbach (Schwarzsee, Kt. Freiburg) und im Spissibach bei Leissigen durch (Abb. 1). «Die Forschung in hydrologischen Einzugsgebieten ist der unmittelbarste Zugang zu Einsichten in die Prozesse des Wasserhaushaltes und in ihre Variabilität in Raum und Zeit. Durch die Umsetzung der gewonnenen Kenntnisse in Modelle lassen sich Prozesse simulieren, und dies kann wiederum unser Prozessverständnis erhöhen. Die verifizierten Modelle können schliesslich z.B. zur räumlichen Interpolation von Punktmessungen, der Vorhersage von Abflussmengen oder zur Hochwasserwarnung verwendet werden» (LANG et al., 1994). Die Wildbacheinzugsgebiete des Rotenbachs und des Spissibachs sind naturräumlich wie nutzungsmässig unterschiedlich beschaffen und bieten sich deshalb an, hydrologisch-geomorphologische Prozesse unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu studieren. Wie alle geschlossenen Einzugsgebiete weisen sie den entscheidenden Vorteil auf, dass die hydrologischen und geomorphologischen Systemantworten am Ausgang räumlich integral erfasst werden können. Aus der schematischen Darstellung des generellen Messkonzeptes in Abb. 2 geht hervor, dass diese Systemantworten in verschiedenen Massstabsebenen untersucht werden müssen.

3.1 Das Testgebiet Rotenbach der WSL

Das Testgebiet Rotenbach (Schwarzsee, Kt. Freiburg) wird von der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL, Birmensdorf) betreut. Der Rotenbach mündet etwa zwei Kilometer nördlich des Ausflusses des Schwarzsees

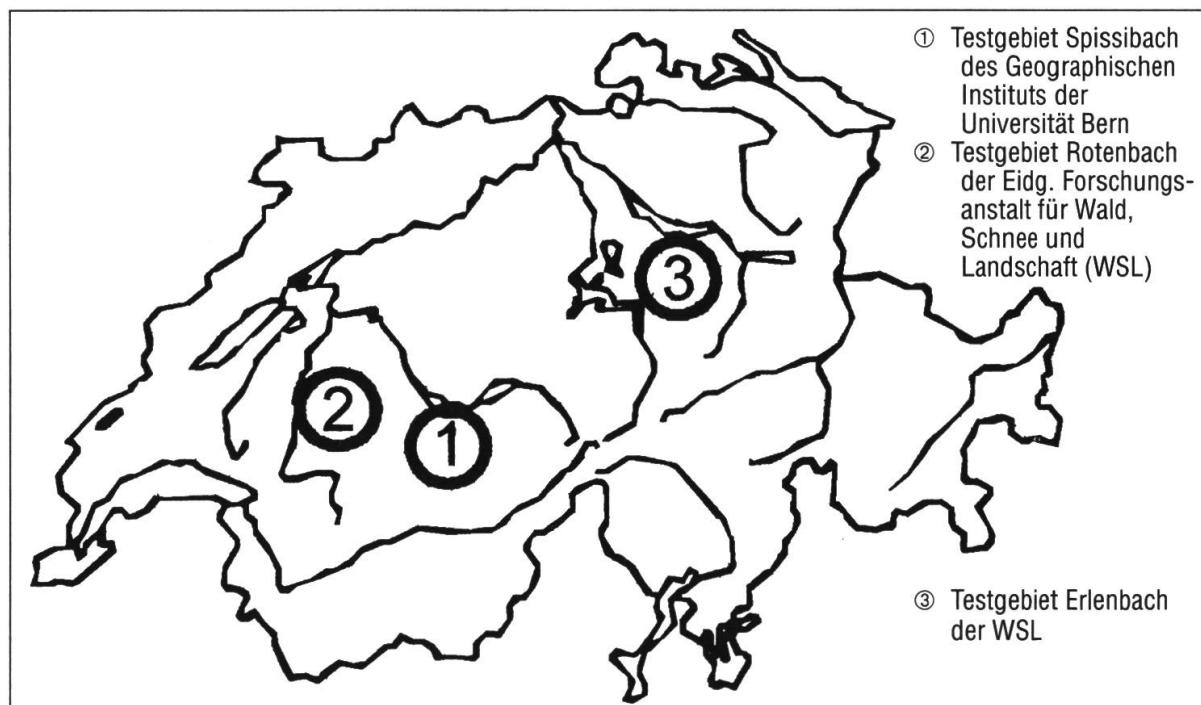


Abb. 1: Testgebiete der Wildbachforschung in der Schweiz (vgl. Kienholz et al. 1996).

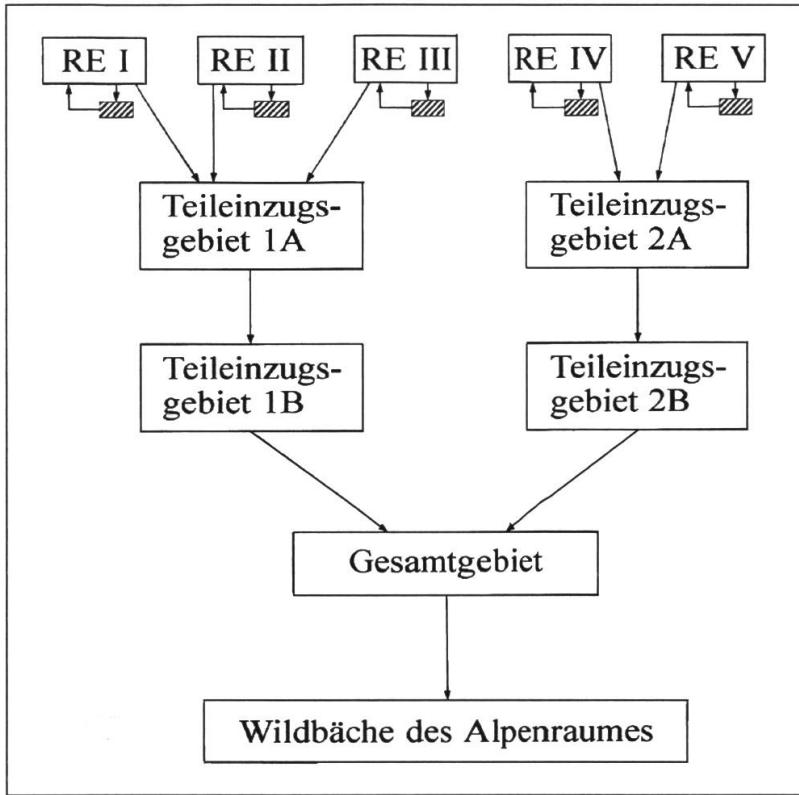


Abb. 2: Generelles Messkonzept (RE: Raumseinheit mit ähnlichen naturräumlichen Bedingungen)

von Westen her in die Warme Sense. Das Einzugsgebiet mit einer Fläche von 1,66 km² und einer mittleren Höhe von 1455 m über Meer liegt an der Ostabdachung des Schweinsberges im Wildflysch der Gurnigelzone. Die Abflussmessstation Rotenbach befindet sich auf 1275 m über Meer.

Tab. 1: Hydrologische Kennwerte des Rotenbachs

Kenngrösse	Wert
mittlerer Jahresabfluss (1971–1979)	85 l/s
mittlere Jahresabflusshöhe (1971–1979)	1617 mm
Gebietsniederschlag, unkorr. (1971–1979)	1841 mm
Verdunstung	224 mm
jährlicher Abflusskoeffizient	0.88
Abflussregime	nival de transition
HQ _{2.33}	≈ 4.8 m ³ /s; ≈ 2.9 m ³ /s km ²
HQ ₅₀	≈ 11.5 m ³ /s; ≈ 6.95 m ³ /s km ²
HQ ₁₀₀	≈ 14 m ³ /s; ≈ 8.45 m ³ /s km ²
Niederschlagsintensität 1 Std., 2.33 Jahre	21 mm/h
Niederschlagsintensität 1 Std., 100 Jahre	46 mm/h
Niederschlagsintensität 24 Std., 2.33 Jahre	2.3 mm/h
Niederschlagsintensität 24 Std., 100 Jahre	5.5 mm/h

In der Tabelle 1 sind wichtige Kennwerte dieses Wildbacheinzugsgebietes zusammengestellt. Der Rotenbach gehört zu den schweizerischen Einzugsgebieten mit den höchsten spezifischen Hochwasserabflüssen. Die 50jährige Spitzenabflussspende

beträgt rund 6950 l/s km², die 100jährige gar 8450 l/s km². Auffallend ist die nach der Wasserbilanz berechnete sehr kleine Gebietsverdunstung von nur 224 mm. Sie liegt weit unter dem nach dem Verfahren von BAUMGARTNER et al. (1983) geschätzten «Erwartungswert» von 430 mm. Dies verdeutlicht einmal mehr die hohe Abflussbereitschaft des Gebietes. Über den Topoindex, der beim TOPMODEL (BEVEN et al., 1994) eine zentrale Rolle spielt, wurde versucht, die Eigenschaften des Gebietes zu visualisieren (Abb. 3): Hohe Topoindex-Werte bedeuten eine hohe Bereitschaft zur Sättigung und damit rasches Ansprechen bei Niederschlagsereignissen. Es kann gezeigt werden, dass zwischen den Topoindex-Werten und den Böden im Einzugsgebiet des Rotenbachs signifikante Zusammenhänge bestehen: Hohe Topoindex-Werte treten in jenen Rasterzellen auf, in denen Böden mit deutlichen Nässezeigern, z.B. Hanggleye mit Oxydationsflecken, kartiert wurden.

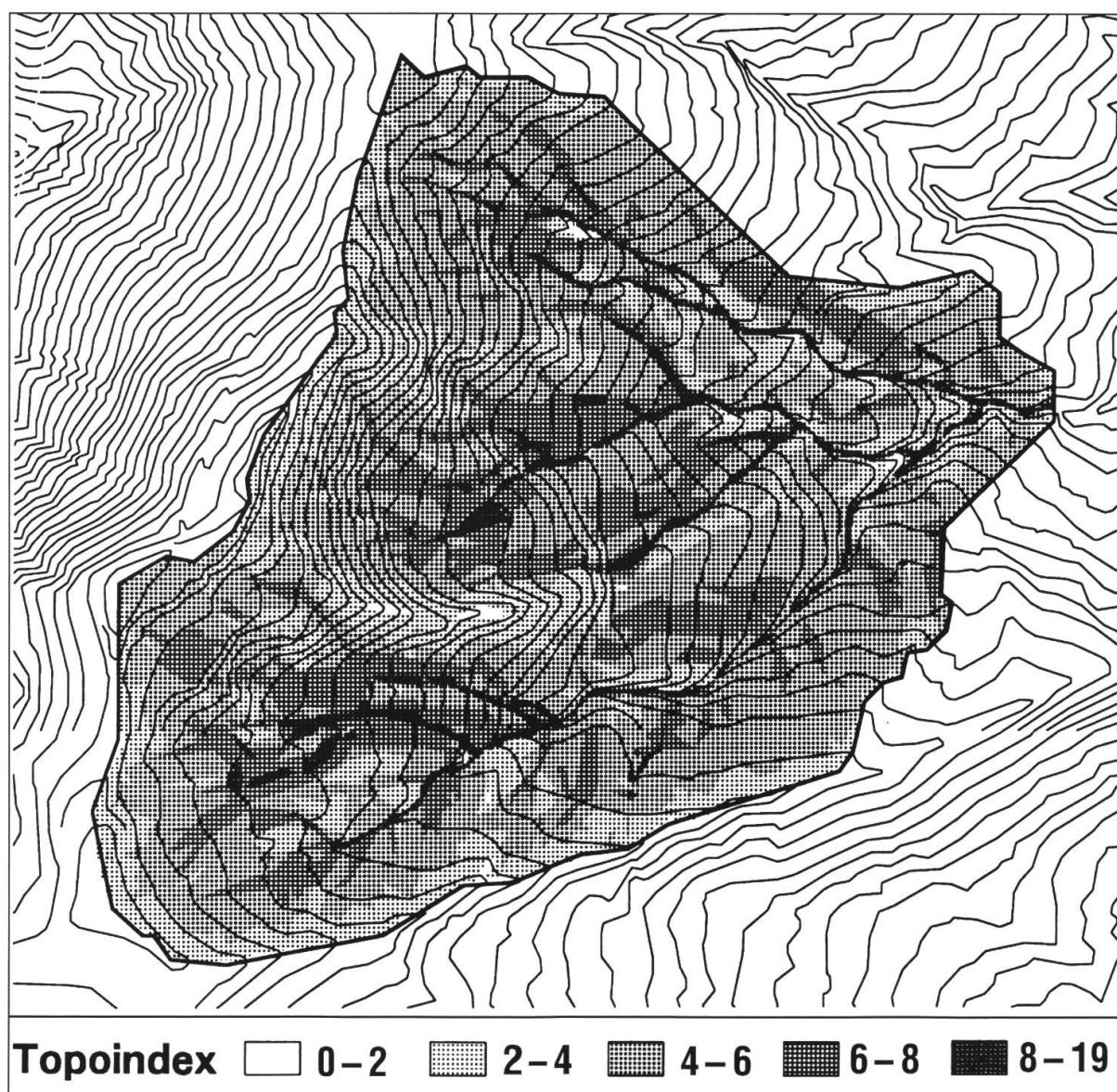


Abb. 3: Räumliche Verteilung des Topoindexes im Rotenbach (aus Weingartner, Kienholz, 1994).

3.2 Spissibach–Leissigen: Das Wildbach-Testgebiet der Universität Bern

3.2.1 Das Einzugsgebiet des Spissibaches

Das Testgebiet Spissibach liegt im Berner Oberland, am Südufer des Thunersees oberhalb des Dorfes Leissigen (vgl. Abb. 1). Es erstreckt sich vom Morgenberghorn (2249 m ü. M.) bis zur Mündung in den Thunersee (558 m ü. M.) bei Leissigen (vgl. Abb. 4). Es umfasst eine Fläche von zirka 2,6 km² und weist eine mittlere Hangneigung von zirka 28° auf. 45% des Einzugsgebiets sind waldbedeckt und 43% sind Weideland oder Nasswiesen. Der obere Teil des Spissibaches liegt im Bereich der Wildhorndecke mit einer Schichtabfolge von der unteren Kreide bis ins Tertiär. Bei den süd- bis ultrahelvetischen Gesteinen im mittleren und unteren Bereich des Einzugsgebietes handelt es sich um eocäne Globigerinenmergel, die sich anhand der darin enthaltenen Sandstein- und Kalkeinlagerungen in einzelne Schuppen oder Gesteinspakete unterteilen lassen. Aufgrund ihrer chaotischen Lagerung ist von einem Melange zu sprechen, das sowohl sedimentären wie auch tektonischen Ursprung besitzt (HUNZIKER, 1992). Generell stehen im Spissibach vor allem sehr verwitterungsanfällige Gesteine an. Einzig die Gipfelpartie des Morgenberghorns wird von relativ resistenten Kieselkalken gebildet. Diese hohe Verwitterungsanfälligkeit des Gesteins ist zusammen mit der grossen Hangneigung als Hauptursache für die zahlreich zu beobachtenden Hangprozesse anzusehen. Dank dieser Voraussetzungen eignet sich der Spissibach für die Analyse dieser Prozesse ausgezeichnet.

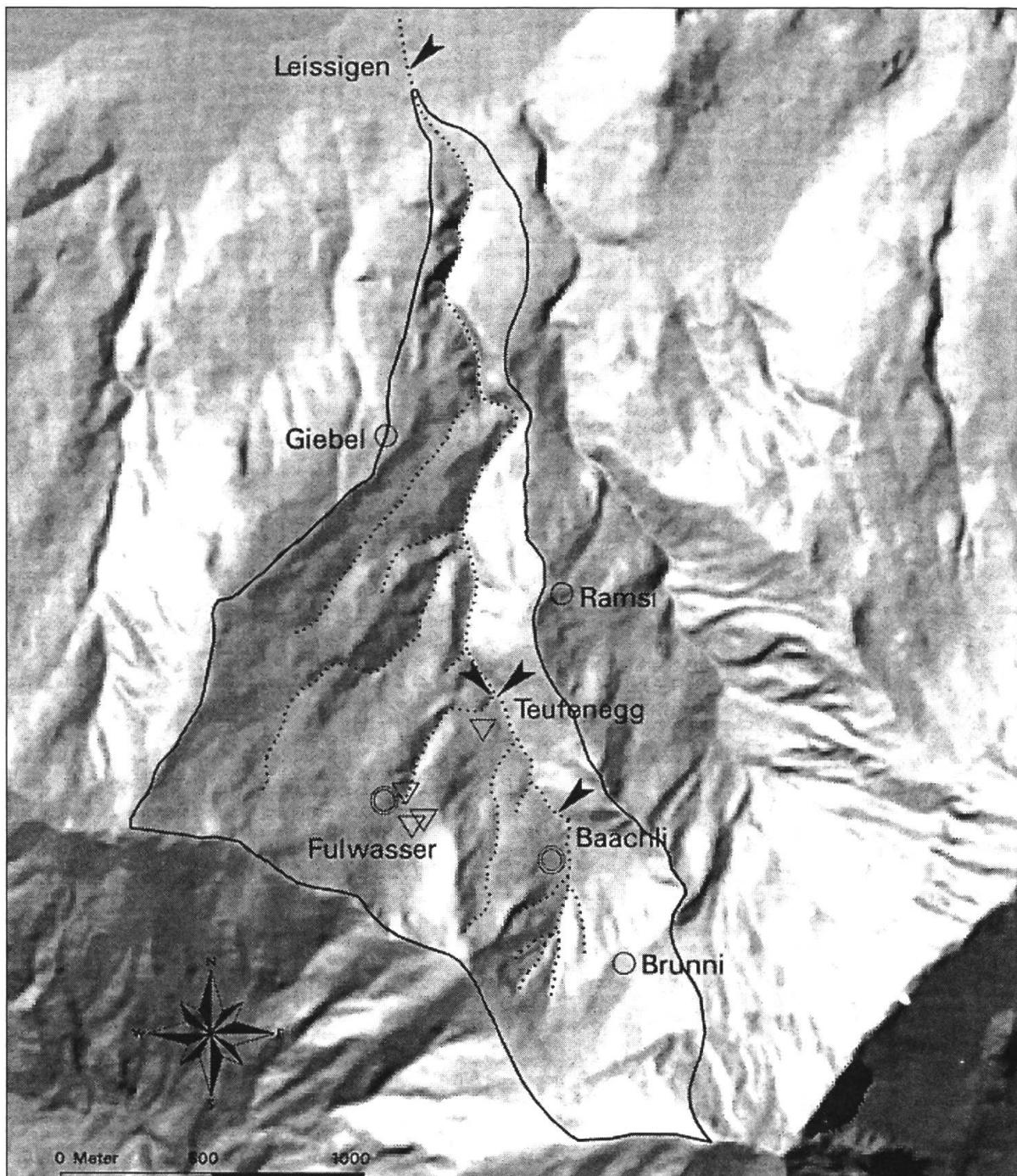
3.2.2 Das Messnetz

Beim Messnetz im Spissibach ist zwischen dem Grundmessnetz und den Kleinstgebieten zu unterscheiden. Das Grundmessnetz dient der Erfassung von Input und Output des ganzen Einzugsgebiets sowie ausgewählter Teileinzugsgebiete (vgl. Abb. 4). Es besteht aus zwei Klimastationen, drei Niederschlagssammlern und vier kombinierten Abfluss-, Leitfähigkeits- und Geschiebemessstellen, und erlaubt die detaillierte Erfassung der Wasser- und Feststoffflüsse.

In den Kleinstgebieten werden die ablaufenden hydrologisch-geomorphologischen Prozesse detailliert studiert. Sie sind mit einer Abflussmessstelle mit Normüberfall, einem Geschiebeabsetzbecken und einem automatischen Schwebstoff-Probeentnahmegerät ausgerüstet. Diese Instrumentierung erlaubt die mikroskalige Erfassung des Abflusses und des Feststoffaustausches. Um auch den durch eine grössere Rutschung verursachten Feststoffaustausch erfassen zu können, wird für alle Kleinstgebiete der Ist-Zustand mit einem detaillierten digitalen Terrainmodell dokumentiert. Tritt ein Ereignis auf, das die Kapazität des Absetzbeckens übersteigt, wird eine Neuvermessung durchgeführt, und der Austausch kann aus der Differenz zwischen den zwei Terrainmodellen berechnet werden.

4. Erste Ergebnisse und Entwicklungsarbeiten

Während im hydrologischen Bereich erste Simulationen bereits erfolgreich durchgeführt werden konnten, sind im Zusammenhang mit der Feststoffverlagerung noch verschiedene messtechnische Probleme zu lösen, Analysemethoden zu entwickeln und Simulationsmodelle zu entwerfen. Dieser Stand der Arbeiten soll im folgenden anhand von zwei Beispielen aufgezeigt werden.



Legende

- | | |
|---|----------------------------|
| — Einzugsgebiet | ○ Niederschlagstotalisator |
| Spissibach | ○ Klimastation |
| ➤ Abfluss- und Geschiebe-
messstelle | ▽ Abflussmessstelle |

Topographische Daten: Bundesamt f. Landestopographie
Reproduziert mit der Bewilligung des
Bundesamtes für Landestopographie vom 29.4.94

Abb. 4: Das Grundmessnetz im Einzugsgebiet des Spissibaches.

4.1. Abflussbildung – erste Ergebnisse

Bei der Abflussbildung, die für das Verständnis der wildbachhydrologischen Prozesse von zentraler Bedeutung ist, lassen sich sowohl im Gesamtgebiet des Spissibachs als auch im Teileinzugsgebiet Baachli deutlich zwei Komponenten unterscheiden, deren Auftreten massgeblich von der Intensität der auslösenden Niederschläge beeinflusst wird: Bei hohen Intensitäten sind die schnell ablaufenden Prozesse dominant; sie führen zu einer steilen, ausgeprägten Hochwasserganglinie. Es muss vermutet werden, dass dabei oberflächennahe laterale Flüsse in gerinnenahen Flächen und Makroporen eine entscheidende Rolle spielen. Bei kleineren Niederschlagsintensitäten dominieren die langsameren Abflussbildungsprozesse; sie führen zu weniger markanten Hochwasserganglinien. Diese langsame Komponente macht sich auch bei den markanten, durch intensive Niederschläge ausgelösten Hochwassereignissen mit einem zeitlich verzögerten zweiten Peak in der Ganglinie bemerkbar (vgl. Abb. 5).

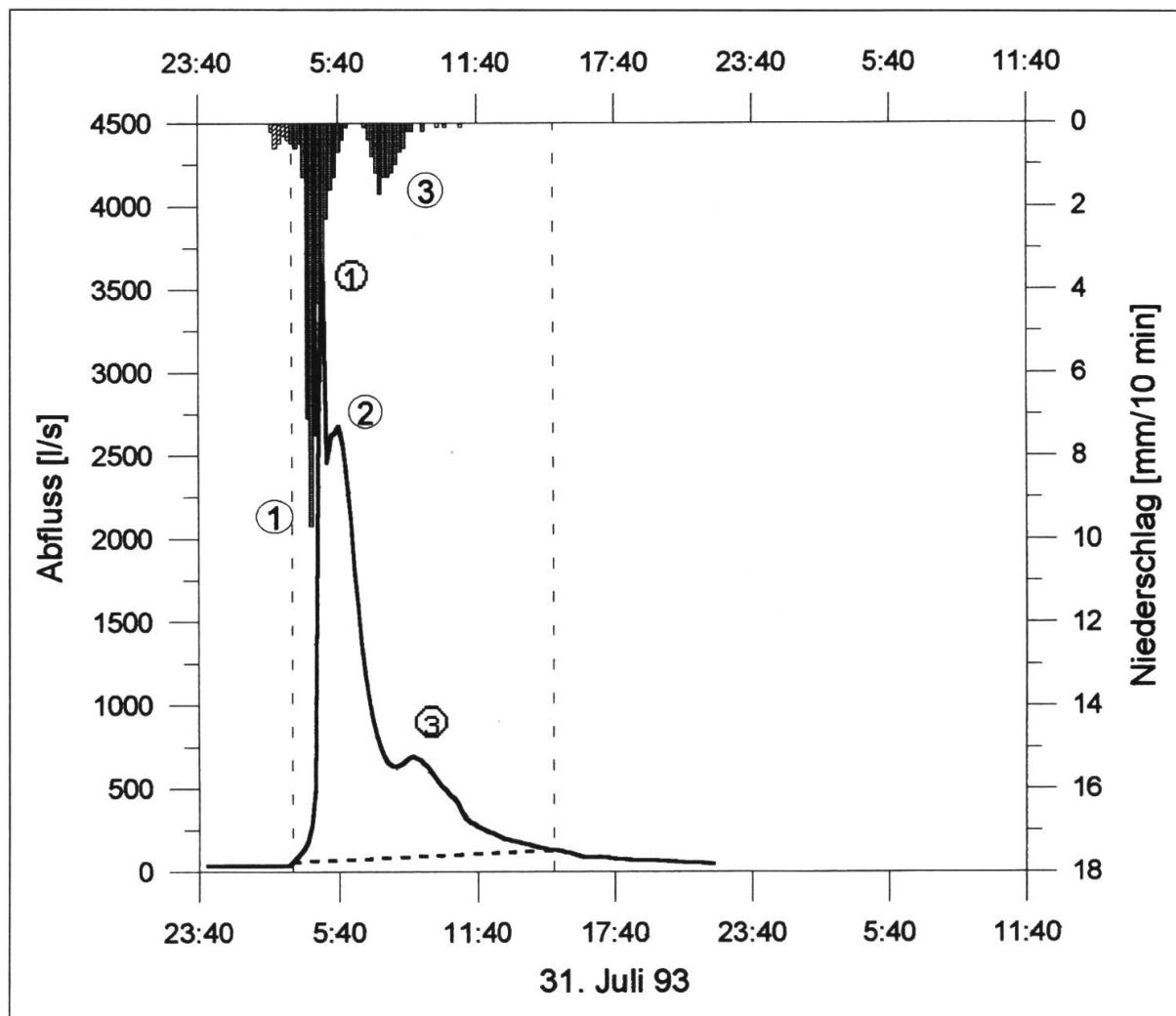


Abb. 5: Das Hochwasser vom 31. Juli 1993 im Spissibach illustriert das zweigipflige Verhalten des Einzugsgebiets. Der Niederschlagspeak (1) verursacht die Abflussspitzen (1) und (2). Der Niederschlagspeak (3), der eine wesentlich geringere Intensität aufweist, hat nur eine Abflussspitze (3) zur Folge.

Der Ablauf eines Hochwasserereignisses wird massgeblich vom Zustand der abflussrelevanten Speicher bei Ereignisbeginn beeinflusst. Zur Charakterisierung dieser Anfangsbedingungen werden oftmals Vorregensummen wie VN_5 und Vorregenindizes wie VN_{21} beigezogen:

$$VN_5 = \sum_{i=1}^5 N_i$$

$$VN_{21} = \sum_{i=1}^{21} k^i * N_i$$

N : Tagesniederschlag

i : Tag vor dem Hochwasserereignis

k : Koeffizient $k < 1$

Verschiedene Studien verdeutlichen nun aber, dass sich diese Parameter nicht eignen, weil sie die entscheidenden Steuerfaktoren zu pauschal beschreiben (z.B. BARBEN und WEINGARTNER, 1995). Deshalb wurde in einer Untersuchung im Wildbacheinzugsgebiet des Rotenbachs (Fläche: 1,6 km², Kanton Freiburg) beispielhaft versucht, die Ausgangsbedingungen von Hochwasserereignissen mit dem Bilanzmodell BROOK (FEDERER und LASH, 1978) physikalisch plausibel zu parametrisieren. Mit dem BROOK-Modell lassen sich die Schwankungen des Sättigungsdefizits der relevanten Speicher – insbesondere jene des Bodenspeichers – zeitlich hochauflöst erfassen. Vergleiche mit real beobachteten Bodenwasserständen bestätigten die Plausibilität der modellierten Werte, so dass die Frage des Zusammenhangs zwischen den Anfangsbedingungen eines Hochwasserereignisses und dem Spitzenabfluss differenzierter als mit den Vorregenparametern angegangen werden konnte. In Tabelle 2 sind die Korrelationen zwischen den Spitzenabflussmengen und wichtigen Rahmenparametern dokumentiert. Die Auswertungen im Rotenbach zeigten, dass grundsätzlich zwischen kurzen und länger andauernden Hochwasserereignissen zu unterscheiden ist.

Tab. 2: Korrelationen zwischen den Spitzenabflussmengen (Q_{max}) und wichtigen Rahmenparametern von je 18 kurzen und langen Hochwasserereignissen im Rotenbach. Bei den ausgewählten Ereignissen handelt es sich um die 36 grössten, ausserhalb der Schneeschmelzperiode aufgetretenen Hochwasser mit Spitzenabflüssen von mehr als 2 m³/s ($r_{sign.} (\alpha = 5\%) = 0.333$)

Parameter	lange Hochwasserereignisse mit Scheitelanstiegszeiten über 5 Stunden	kurze Hochwasserereignisse mit Scheitelanstiegszeiten unter 5 Stunden
	Q_{max}	Q_{max}
N_{sum} : Niederschlagssumme des N/A-Ereignisses	0.20	0.68
r_{max} : Max. Intensität des N/A-Ereignisses	0.53	0.36
S_{def} : Sättigungsdefizit der Wurzelzone vor Ereignisbeginn	-0.09	0.60

Bei längeren Ereignissen mit eher kleinen Niederschlagsintensitäten wird der Bodenspeicher unabhängig von der Grösse des Sättigungsdefizits in der Regel gefüllt. Das Sättigungsdefizit ist allerdings im Flyschgebiet des Rotenbachs zu keiner Jahreszeit sehr gross. Erst wenn die Speicher gesättigt sind, setzt der Abfluss ein. Die Variationen der Niederschlagsintensitäten wirken sich dann direkt auf die Hoch-

wassergangline aus, wie aus der signifikanten Korrelation zwischen r_{max} und Q_{max} hervorgeht. Das Sättigungsdefizit übt demnach keinen signifikanten Einfluss auf den Hochwasserabfluss aus. In Abb. 6 (oben) ist ein charakteristisches Ereignis dieses Typs dargestellt.

Grundsätzlich verschieden sind die Verhältnisse bei den Hochwasserereignissen mit kurzen Anstiegszeiten: Grosse Aufmerksamkeit verdient die positive (!) Korrelation zwischen dem Sättigungsdefizit und der Abflussspitze: Je höher das Sättigungsdefizit ist, um so höher fällt die Abflussspitze aus. Offensichtlich wirkt das Sättigungsdefizit bei diesem Ereignistyp nicht abflussverzögernd und -dämpfend. Die Wasserleitfähigkeit des Bodens nimmt mit abnehmendem Wassergehalt ab. Das bedeutet, dass ein vor Ereignisbeginn eher trockener Boden eine verhältnismässig kleine Infiltrationskapazität aufweist, so dass die hohen Niederschlagsintensitäten dieses Typs die Infiltrationskapazitäten mindestens zeitweilig überschreiten und lokal einen oberflächlichen bis oberflächennahen Abfluss provozieren. Dabei ist aber auch in Betracht zu ziehen, dass nach längeren Trockenperioden in der tonigen Bodenmatrix des Rotenbach-Gebietes Schwundrisse entstehen können, die als bevorzugte, schnelle Wasserwege dienen. Abb. 6 (unten) zeigt ein für diesen Typ charakteristisches N/A-Ereignis. Bei diesem Ereignistyp setzt der Abfluss unmittelbar nach dem Niederschlagsbeginn ein.

Aufgrund dieser Untersuchungen basiert das «Worst-case»-Szenario im Wildbacheinzugsgebiet des Rotenbachs auf jenem Ereignis, bei dem intensive Niederschläge auf einen ausgetrockneten Boden fallen.

Das Rotenbach-Einzugsgebiet weist – wie bereits erwähnt – im Vergleich mit anderen schweizerischen Einzugsgebieten ähnlicher Flächen ausserordentlich hohe Abflussspenden auf (Tab. 1). Wie die Ergebnisse der Modellierungen mit dem TOP-MODEL belegen, können diese hohen spezifischen Abflüsse nur durch einen sehr hohen Anteil der beitragenden Flächen an der Gesamtfläche, durch oberflächliche bzw. oberflächennahe laterale Fliesswege und/oder durch ein ausgeprägtes System von Makroporen, die als schnelle laterale Fliesswege dienen, zustande kommen.

4.2. Entwicklung des Geschiebetracers Legic®

Da für verschiedene wichtige Prozesse der Feststoffmobilisierung und -verlagerung keine unter den besonders anspruchsvollen Bedingungen eines Wildbaches erprobten Messsysteme zur Verfügung stehen, bilden Arbeiten im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung der Messtechnik einen wichtigen Bestandteil der gegenwärtigen Arbeiten. Als Beispiel wird hier die Entwicklung eines Geschiebetracers skizziert. Angaben über die Bewegung einzelner Geschiebekörper in einem Gerinne bilden die Grundlage für alle probabilistischen Ansätze zur Simulation des Geschiebetransports, so z.B. für das Verfahren PROBLOAD (vgl. HEGG, 1996). Um derartige Informationen zu erhalten, werden einzelne Geschiebekörper mit sogenannten Geschiebetracern markiert und auf ihrem Weg verfolgt. Herkömmliche Magnet- oder Radiotracer haben den Nachteil, dass die Steine während der Bewegung nicht beobachtet werden können, oder dass ihre Lebensdauer eng begrenzt ist (vgl. z.B. BUSSKAMP und GINTZ, 1994). Deshalb wurde am Geographischen Institut der Universität Bern ein neuartiger Geschiebetracer entwickelt und getestet (BURREN, 1995). Grundlage für diesen Geschiebetracer bildet das berührungslose Schliess- und Iden-

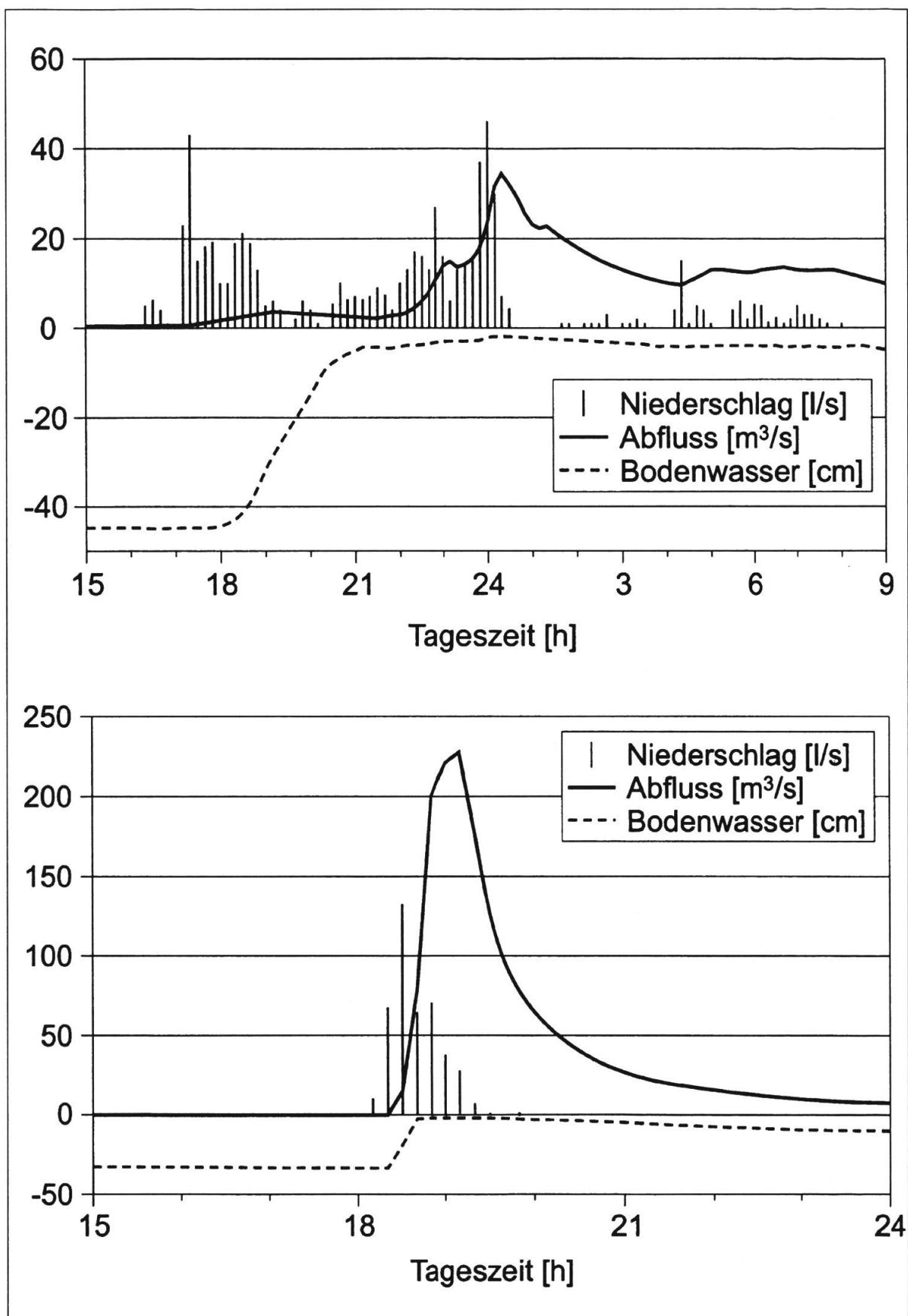


Abb. 6: Charakteristische Hochwasserereignisse im Kleingebiet Rotenbach (Q: Abflussmenge, P: Niederschlag, BW: Bodenwasserpegel).

tifikationssystem Logic®. Herzstück dieses Systems ist eine Steuereinheit mit einer angeschlossenen kreisförmigen Antenne. In der näheren Umgebung dieser Antenne wird ein elektromagnetisches Feld aufgebaut. Gelangt nun die zweite Hauptkomponente des Systems, ein Mikrochip mit einer eigenen kleinen Antenne (etwa in der Grösse einer Kreditkarte) in dieses Feld, können die beiden Teile miteinander kommunizieren und gegenseitig Daten austauschen. Dabei bezieht der Mikrochip seine Betriebsenergie aus dem Feld der Antenne der Steuereinheit, ist also unabhängig von der Stromversorgung, z.B. durch eine Batterie, und hat so eine beinahe unbegrenzte Lebensdauer.

Für den Einsatz als Geschiebetracer wird die Steuereinheit in der Nähe einer Abflussmessstelle installiert und deren Antenne so im Bachbett befestigt, dass das Geschiebe bei einem Hochwasser über die Antenne hinweg transportiert wird. Der Mikrochip mit seiner kleinen Antenne wird in Steine eingesetzt, die oberhalb der Messstation im Bach ausgesetzt werden. Werden nun bei einem Hochwasser die markierten Steine mobilisiert und an der im Bachbett befestigten Antenne vorbei transportiert, kann festgestellt werden, wann welcher Stein die Messstation passiert. Zusammen mit den Abflussmessungen und den vor dem Aussetzen aufgezeichneten Eigenschaften des bewegten Steins und seiner Einbettung im Bachbett, erlaubt diese Information Rückschlüsse auf die Mobilisierungs- und Transportbedingungen. Werden mehrere Antennen hintereinander fest im Bachbett eingebaut, kann ein Stein durch das ganze Gerinnesystem verfolgt werden.

Das Gewicht der Steuereinheit ist so gering, dass sie auch in schwierigem Gelände, wie dies das Bett eines Wildbachs die Regel ist, getragen werden kann. Für die Zukunft ist deshalb geplant, ausgesetzte Steine zwischen Hochwasserereignissen mit einer tragbaren Antenne aufzuspüren, um so zusätzliche Informationen über die bevorzugten Ablagerungsstellen und -situationen zu erhalten.

BURREN (1995) konnte die Funktionstüchtigkeit des erläuterten Systems in verschiedenen Labor- und Feldversuchen nachweisen. Zur Zeit sind deshalb Arbeiten im Gange, im Spissibach feste Messstellen mit einer Steuereinheit und einer Antenne einzubauen, sowie eine grössere Serie von Steinen, die mit einem Mikrochip markiert sind, bereitzustellen. Dieses neuartige Messsystem wird in Zukunft einen genaueren Einblick in die Bewegung einzelner Geschiebekörper in einem Wildbach erlauben.

Literatur

- BARBEN, M., WEINGARTNER, R., 1995: Hochwasserereignisse in Wildbächen – Analyse grösserer Ereignisse im Rotenbach (Schwarzsee). In: Schweizer Ingenieur und Architekt 113. Jahrgang, Nr. 21:499–502, Zürich.
- BAUMGARTNER, A., REICHEL, E., WEBER, G., 1983: Der Wasserhaushalt der Alpen. München.
- BEVEN, K.J., LAMB, R., QUINN, P., ROMANOWICZ, R., FREER, J., 1995: TOPMODEL and GRIDATB: A User's Guide to the Distribution Versions, CRES Technical Report TR110 (2nd Edition), Lancaster University.
- BURREN, S., 1995: Entwicklung eines neuen Geschiebetracers. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.
- BUSSKAMP, R., GINTZ, D., 1994: Geschiebefrachterfassung mit Hilfe von Tracern in einem Wildbach (Lainbach, Oberbayern). In: BARSCH, D., MÄUSBACHER, R., PÖRTGE, K.-H., SCHMIDT, K.-H.: Messungen in fluvialen Systemen, Feld- und Labormethoden zur Erfassung des Wasser- und Schwebstoffhaushaltes. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

- FEDERER, A., LASH, D., 1978: BROOK: A Hydrologic Simulation Model for Eastern Forests. Water Resources Research Center, Report No. 19, New Hampshire.
- HEGG, Ch., 1996: Zur Erfassung und Modellierung von gefährlichen Prozessen in steilen Wildbacheinzugsgebieten. *Geographica Bernensia*. Geographisches Institut der Universität Bern. (in Vorb.)
- HUNZIKER, G., 1992: Zur Geologie im Gebiet Leissigen – Morgenberghorn (Berner Oberland). Unveröffentlichte Diplomarbeit am Geologischen Institut der Universität Bern.
- KIENHOLZ, H., HEGG, C., 1993: Naturkatastrophen: Wildbäche, synoptische Gefahrenbeurteilung und Synthese. Vorstudie Nr.12, Nationales Forschungsprogramm 31: «Klimaänderungen und Naturkatastrophen», Bern.
- KIENHOLZ, H., KELLER, H., AMMAN, W., WEINGARTNER, R., GERMANN, P., HEGG, Ch., MANI, P., RICKENMANN, D., 1996: Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Schlussbericht Projekt NFP-31. VdF, Zürich. (in Vorb.)
- LANG, H., BRAUN, L., ROHRER, M., STEINEGGER, U., 1994: Was bringt uns die Forschung in hydrologischen Einzugsgebieten? In: Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 35: 52–60, Bern.
- SCHÄDLER, B., 1990: Abfluss. Mitt. der Versuchsanst. für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. ETHZ. Nr. 108: 109–125, Zürich.
- SCHORER, M., 1992: Extreme Trockensommer in der Schweiz und ihre Folgen für Natur und Wirtschaft. *Geographica Bernensia* G40, Bern.
- WEINGARTNER, R., KIENHOLZ, H., 1994: Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Konzepte und erste Ergebnisse aus Untersuchungen in den Testgebieten Rotenbach (Schwarzsee) und Spissibach (Leissigen). In: Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 35: 120–133, Bern.

Persönlich

Hans Kienholz. *In seiner Vorlesung und seinen Übungen zur «vergleichenden Länderkunde» bzw. zu «Typlandschaften» hat uns Bruno Messerli vor dem Hintergrund eines kritischen Naturdeterminismus unterschiedlichste Lebensräume der Erde mit grosser Begeisterung nähergebracht und uns mitgerissen zum definitiven Entschied für ein Geographie-Studium... mitgerissen auf unvergessliche Exkursionen nach Sizilien und in die zentrale Sahara. Nicht nur mitgerissen, sondern uns in einer diskret, aber nachdrücklich fordernden Art zur selbständigen Arbeit und verbindlichen Diskussionsbeiträgen geführt. Wohltuend im Stil die erste offene Ausschreibung von Assistentenstellen an unserem Institut, das Glück zu den Ausserkorenen gehören zu dürfen. Fordern, Fördern und Freiheit lassen, diese drei F – meist in der für mich «richtigen» Gewichtung – haben sein Verhältnis zu mir fortan geprägt. Obschon selber in der Paläogeomorphologie und Paläoklimatologie verwurzelt, hat er meine Arbeiten in die Richtung der anwendungsorientierten Forschung und in die Prognostik von Naturgefahren angeregt und gefördert. Trotz – nein – wegen der daraus folgenden fachlichen Eigenständigkeit haben wir immer wieder Brücken schlagen können, sei es im Rahmen der MAB-Projekte oder der Fragestellung zu den «Highland-Lowland-Interactive-Systems» in Nepal.*

Rolf Weingartner. *Bruno Messerli hat für meine wissenschaftliche Entwicklung eine entscheidende Rolle gespielt: Er hat mich gelehrt, die richtigen Fragen zu stellen, Probleme zu erfassen und zu formulieren; er hat die Rahmenbedingungen geschaffen, um nach eigenständigen Lösungen suchen zu können, und er hat anlässlich von Vorlesungen, Vorträgen und Exkursionen demonstriert, wie diese Lösungen präzis, engagiert und überzeugend präsentiert werden können. Mit Bruno Messerli durfte und darf ich Wissenschaft als Faszination erleben!*