

Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie

Groupe de travail pour l'hydrologie opérationnelle (GHO)

Gruppo di lavoro per l'idrologia operativa

EMPFEHLUNG ZUR ABSCHÄTZUNG VON FESTSTOFFFRACHTEN IN WILDBÄCHEN

TEIL II

FACHLICHE GRUNDLAGEN UND FALLBEISPIELE

BERN, 1996

Herausgabe und Vertrieb:

Edition et distribution:

Landeshydrologie und -geologie, 3003 Bern

Service hydrologique et géologique national, 3003 Berne

Vorwort

Die topographischen und hydrologischen Gegebenheiten der Schweiz, verbunden mit einer hohen Dichte an Siedlungen und Infrastrukturen bedingen eine grosse Anfälligkeit der Menschen und Sachwerte gegenüber Hochwasser. Neben dem eigentlichen Hochwasser verursachen die mitgeführten Feststoffe grosse Schäden. Die Abschätzung des Erosionspotentials von Wildbachgebieten und des Transportvermögens von Wildbächen stellen für die Planung von Schutzmassnahmen eine äusserst wichtige Grundlage dar. Leider bestehen gerade bei dieser Grundlagenbeschaffung grosse Unsicherheiten und Kenntnislücken. Um einen Beitrag zur Verbesserung dieser Situation zu leisten, haben die Landeshydrologie und -geologie (LHG) beim Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft und das Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW) zusammen mit der Abteilung Physische Geographie des Geographischen Institutes der Universität Bern (GIUB) eine Empfehlung für die Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen erstellt. Die Empfehlung basiert hauptsächlich auf Vorarbeiten, welche im Rahmen einer Dissertation von C. Lehmann am Geographischen Institut ausgeführt wurden. Bei der Empfehlung wurde versucht, das heutige Wissen in eine praktische Anleitung für Fachleute einzubauen, welche mit geologischen, geomorphologischen und wasserbaulichen Fragestellungen vertraut sind und Problemstellungen in Wildbachgebieten zu lösen haben. Es ist vorgesehen, die Empfehlung anzupassen, sobald sich der Kenntnisstand über die ablaufenden Prozesse verbessert hat.

Die Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen umfasst drei Teile:

- Teil I gibt dem Praktiker eine genaue Anleitung in Form eines Handbuches, wie er die Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen durchzuführen hat.
- Der vorliegende Teil II, *Fachliche Grundlagen und Fallbeispiele*, bildet einen integrierenden Bestandteil der Empfehlung. Neben einer theoretischen Einführung in die Problematik liefert er ausgesuchte Hintergrundinformationen zu dem Verfahren. Fallbeispiele erleichtern dem Benutzer die Anwendung der Empfehlung. Am Schluss des Teil II findet sich ein Glossar, in dem die in der Empfehlung verwendeten Ausdrücke definiert werden.
- Teil III enthält die Beschreibung eines Rechenprogramms.
Um dem Praktiker die Anwendung der Empfehlung zu erleichtern, wurde ein Computerprogramm entwickelt, mit dem man die notwendigen Berechnungen durchführen kann.

Die Empfehlung ist ein Gemeinschaftswerk von LHG, BWW, GIUB und der GHO. Sie wurde von den Herren Ch. Lehmann, M. Spreafico und O. Naef erstellt. Die Arbeiten wurden begleitet durch die Herren H. Kienholz, A. Götz und H.P. Willi. Die Eidg. Forstdirektion leistete wertvolle Mitarbeit. Für Hinweise und Informationen oder für das Testen des Verfahrens wird den folgenden Personen gedankt: H. Aschwanden, R. Bart, J. Berwert, A. Bettschen, H. Fischer, F. Forster, A. Geissel, P. Greminger, B. Herzog, J. Hess, R. Hunziker, M. Jaeggi, A. Jakob, R. Loat, F. Naef, A. Petrascheck, D. Rickenmann, C. Rickli, H. Romang, B. Schädler, M. Schweizer, G.M. Semadeni, R. Weingartner, J. Zeller und M. Zimmermann. Für die Reinschrift sei Frau E. Schneider gedankt.



Dr. M. Spreafico

Präsident der Gruppe
für operationelle Hydrologie

Inhaltsverzeichnis

1. FACHLICHE GRUNDLAGEN DER WILDBACHPROZESSE	7
1.1 Das Wildbachsystem	7
1.2 Die wichtigsten Lockergesteine	8
A) Moränenmaterial	8
B) Hangschutt	10
C) Sturzschnitt	11
D) Bach- und Murschutt	11
1.3 Prozesse der Feststoffmobilisation	14
A) Prozesse im Gerinne	15
B) Rutschungs- und Kriechbewegungen im Hangbereich	18
C) Sturzprozesse	20
D) Schnee und Lawinen	20
1.4 Relevanz der Geschiebeherde während des Ereignisses.....	20
A) Bedeutung der Geologie für die Vorgänge der Feststofflieferung und - verlagerung	21
B) Feststofflieferung in das Gerinne	21
C) Materialbeschaffenheit	21
D) Lage in bezug auf das Hauptgerinne	22
E) Zeitpunkt der Feststofflieferung	22
1.5 Fazit für die Beurteilung der Relevanz der Geschiebeherde.....	24
1.6 Feststofftransport im Gerinne.....	27
1.6.1 Sohlzustand	27
A) Sohle in Eintiefung	27
B) Sohle in latenter Erosion	27
C) Sohle in Beharrung.....	28
D) Sohle in Auflandung	28
E) Flachstrecken.....	30
1.6.2 Verlagerungsprozesse.....	31
A) Geschiebetransport	31
B) Murgänge.....	32
C) Abschätzung einzelner Parameter	35
2. VORARBEITEN FÜR DIE ABSCHÄTZUNG VON FESTSTOFFFRACHTEN.....	40
2.1 Beschaffung der Unterlagen	40
2.1.1 Studium und Interpretation der Unterlagen	40
2.1.2 Karten- und Luftbildinterpretation	41
2.2 Massgebende Abflussganglinie.....	41
A) Hochwasserformeln.....	42
B) Verfahren nach Koella.....	42
C) Ermittlung der Abflussganglinie	50
D) Laufzeitverfahren	50
3. FELDAUFNAHMEN	54
3.1 Abschätzung der Murfähigkeit im Gelände	54
3.1.1 Erkennungsmerkmale	54
3.1.2 Mögliche Entstehungsorte für Murgänge	56

3.2	Aufnahmen in nicht murfähigen Wildbächen.....	56
3.2.1	Aufnahme der Parameter für die Berechnung der Transportkapazität.....	56
3.2.2	Erfassung der relevanten Feststoffherde	57
	A) Schätzung des Feststoffpotentials der Gerinnesohle	57
	B) Feststoffherde im Gerinnebereich (Böschung)	59
	C) Feststoffherde im Hangbereich.....	61
3.3	Aufnahmen in murfähigen Wildbächen mit Möglichkeiten der Zwischenlagerung von Feststoffen	64
AUSWERTUNG DER FELDAUFNAHMEN		66
4.1	Auswertung bei nicht murfähigen Wildbächen.....	66
4.1.1	Analyse des Sohlenmaterials	66
4.1.2	Berechnung der Feststoffbilanz für jedes Querprofil	66
4.2	Auswertungen bei murfähigen Wildbächen mit Möglichkeiten der Zwischenlagerung von Feststoffen	66
4.3	Zeitbedarf für die Durchführung der Arbeiten.....	68
5.	FALLBEISPIELE	69
5.1	Sandbach bei Grindelwald	69
5.1.1	Vorarbeiten	69
	A) Beschaffung von Unterlagen	70
	B) Studium und Interpretation von Dokumenten.....	70
	C) Karten- und Luftbildinterpretation	70
	D) Erste zusammenfassende Wildbachbeurteilung	71
	E) Massgebende Hochwasserspitze	72
5.1.2	Feldaufnahmen	74
	A) Abschätzung der Murfähigkeit im Gelände	74
	B) Aufnahmen entlang des Gerinnes.....	76
5.1.3	Auswertungen	87
	A) Analyse des Sohlenmaterials.....	87
	B) Berechnung der Feststoffbilanz für jedes Querprofil	87
5.2	Müllbach, Hergiswil	90
5.2.1	Vorarbeiten	90
	A) Beschaffung von Unterlagen	90
	B) Studium von Dokumenten	90
	C) Karten- und Luftbildinterpretation	91
	D) Erste zusammenfassende Wildbachbeurteilung	92
	E) Massgebende Hochwasserspitze	92
5.2.2	Feldaufnahmen	95
	A) Abschätzung der Murfähigkeit im Gelände	95
	B) Aufnahmen entlang des Gerinnes.....	95
5.2.3	Auswertungen	104
6.	GLOSSAR	105
7.	LITERATURVERZEICHNIS	111

1. Fachliche Grundlagen der Wildbachprozesse

1.1 Das Wildbachsystem

Jeder Wildbach weist in seinen Erscheinungsformen (Einzugsgebiet und Gerinnesystem) typische Merkmale auf, die in einer bestimmten räumlichen Anordnung und Funktion zueinander stehen. Die in verschiedenen Wildbachgebieten ablaufenden Prozesse können sehr unterschiedlich sein. Somit ist jeder Wildbach als Individuum zu betrachten.

Das Einzugsgebiet setzt sich aus Hängen, Runsen und dem Gerinnesystem zusammen, welches ein Haupt- und evtl. ein oder mehrere Seitengerinne umfasst (Fig. 1). In den meisten Fällen besteht ein Schwemm- oder Murkegel. Die Beschaffenheit des Wildbacheinzugsgebietes (Form, Grösse, Relief, Geologie, Böden und Vegetation) beeinflusst die verschiedenen Prozesse. Hier sind die ober- und unterirdischen Abflussverhältnisse, Ausmass und Art der Aufbereitung von Geschiebe, die Lage der Geschiebeherde sowie die Geschiebelieferung in das Gerinne besonders hervorzuheben.

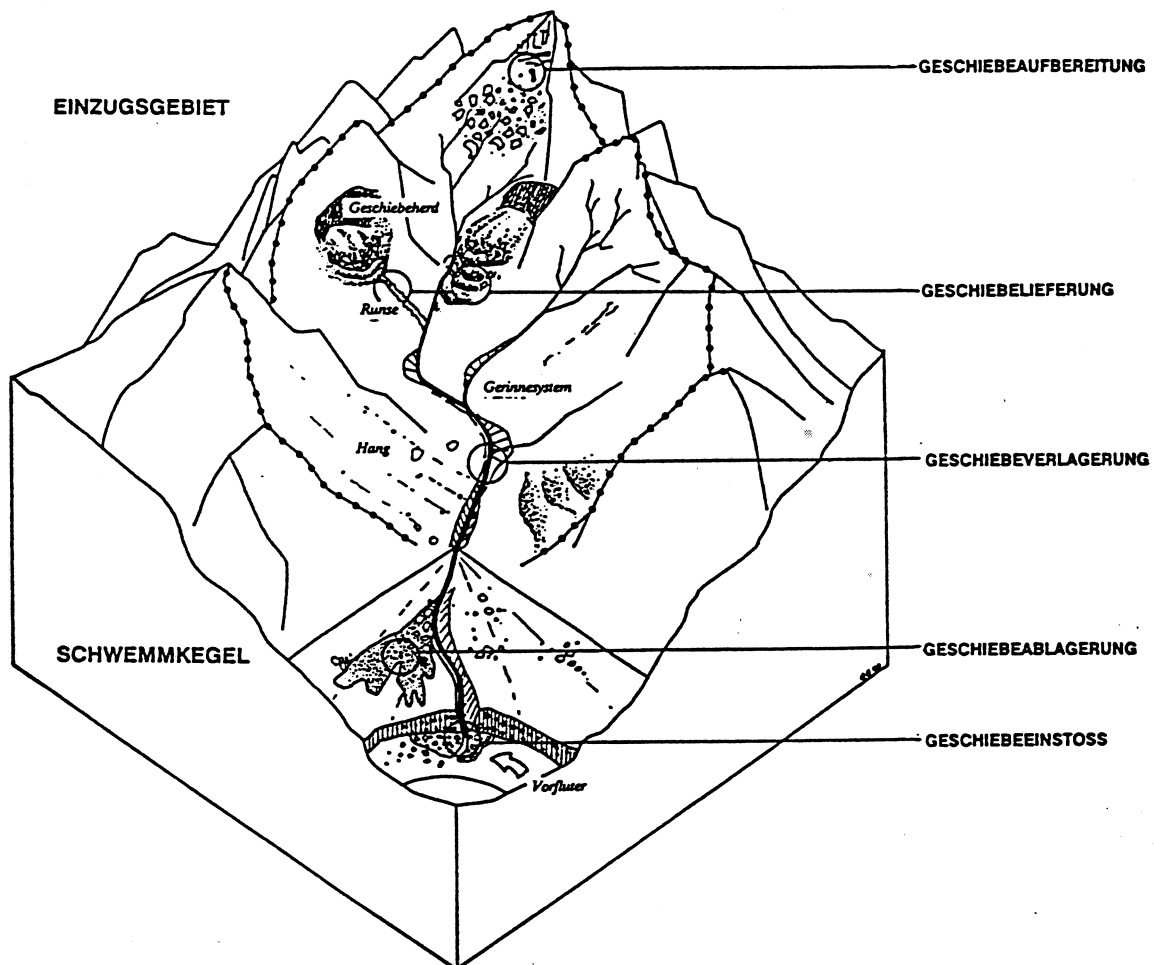


Fig. 1 Einzugsgebiet und Gerinnesystem eines Wildbachs

Die erwähnten Elemente, vor allem die geologischen und hydrologischen Verhältnisse, beeinflussen auch Anlage und Ausprägung der Gerinne. Die Anlage des Gerinnesystems als Ganzes beeinflusst zusammen mit den Abflüssen und weiteren Faktoren die Erosion, Umlagerung und Ablagerung von Feststoffen und die Art der Feststoffverlagerung (Geschiebetransport oder Murgänge).

Die meisten Wildbäche verlaufen vor der Mündung in den Vorfluter über einen Schwemmkegel. Der Schwemmkegel ist das natürliche Ablagerungsgebiet des Wildbachs. Neben dem Entwicklungszustand des Kegels spielen auch örtliche Gegebenheiten eine Rolle, wie sich Hochwasser und Feststoffe ausbreiten können und welchen Schaden sie allenfalls anrichten.

Für den Feststoffhaushalt eines Wildbacheinzugsgebietes können folgende Prozesse unterschieden werden:

- Produktion und Mobilisierung von Feststoffen
- Feststofflieferung in das Gerinne
- Feststoffverlagerung im Gerinne
- Ablagerung von Feststoffen auf einer Flachstrecke, auf dem Schwemmkegel oder in einem künstlichen Geschiebeablagerungsplatz
- Feststoffeintrag in den Vorfluter.

Der Verlagerungsprozess im Gerinne spielt eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Grösse der Feststofffracht. Es wird grob unterschieden zwischen Geschiebetransport und Murgängen.

Murgänge vermögen grössere Feststoffbeträge zu mobilisieren und zu verfrachten. Sie verfügen über eine sehr hohe Energie, weshalb sie besonders zerstörerisch wirken können. Wissenschaftlich sind sie im Vergleich zum Geschiebetransport noch wenig erforscht. Es gibt zur Zeit kein Berechnungsverfahren um die Kubatur von Murgängen zu bestimmen.

Der Geschiebetransport in Wildbächen verläuft sehr unregelmässig. Gründe dafür sind, neben der Wasserführung, stark schwankendes Gefälle, oft ausgeprägte Abtreppe des Längenprofils (Step-pool), Veränderungen in der Sohlenbreite, uneinheitliche Sohlen- und Böschungsrauigkeiten, häufig auftretende Hindernisse und oft ein hoher Anteil an bettfremdem Material (z. B. Holz). Insbesondere die grösseren Komponenten verlagern sich zeitlich und räumlich sehr unregelmässig. Bei hohen Gefällen entsteht ein Feststoff-Wassergemisch, welches eine viel höhere Dichte als Wasser aufweist und zu murgangähnlichem Transport führt. Dieser Übergangsbereich ist nicht genau definierbar. Während desselben Ereignisses können, lokal und zeitlich versetzt, verschiedene Spielarten der Feststoffverlagerung vorkommen.

1.2 Die wichtigsten Lockergesteine

Die Lockergesteine werden nach ihrer Entstehung unterschieden:

- Moränenmaterial
- Hangschutt
- Sturzschnitt
- Bach- und Murschutt.

A) Moränenmaterial

Durch die quartäre Vergletscherung wurden grosse Teile der alpinen Täler und Hänge mit Moränenmaterial unterschiedlicher Mächtigkeit überdeckt. Dieses Material ist vielfach das entscheidende Substrat für die Bodenbildung.



Fig. 2 Moraine de fond dans le Saxetbach, Oberland bernois

D'après le lieu de dépôt et le type de formation, on distingue:

- Moraines de fond, avec les caractéristiques suivantes: haute teneur en matériaux fins, généralement une mauvaise perméabilité et souvent des matériaux consolidés suite à la sédimentation et/ou des compressions. Il se forme souvent des parois abruptes, lesquelles se mettent rarement en mouvement, et sont altérées et érodées à la surface (Fig. 2).
- Cordons morainiques (moraines latérales et moraines frontales): ils ne sont importants que ponctuellement comme source de matière solide pouvant être charriée. Par contre, ils peuvent agir en retenant la matière solide ou en empêchant son apport. Aussi longtemps qu'il n'y a pas accumulation et comblement directement en amont des moraines latérales, celles-ci forment souvent des obstacles naturels pour les matériaux meubles des pentes. Derrière ces moraines agissant comme digues, des tronçons de chenal plus plats peuvent se former, ce qui accélère l'alluvionnement. La rupture d'une telle moraine peut conduire à une bouffée de matériaux charriés.

B) Eboulis de pente

Un éboulis de pente se compose de produits d'altération, lesquels recouvrent de nombreux versants. Les matériaux des éboulis de pente sont généralement mal triés et présentent souvent un grand spectre granulométrique, de l'argile jusqu'à de gros blocs (Fig. 3).

B) Hangschutt

Hangschutt besteht aus Verwitterungsprodukten, welche viele Hangpartien bedecken. Das Material des Hangschutts ist generell schlecht sortiert und umfasst oft ein weites Korngrössenspektrum von Ton bis zu groben Blöcken (Abb. 2).

In Wildbachgebieten prägt der Hangschutt in vielen Fällen die steilen, oft bewaldeten Bacheinhänge. Diese Lockermaterialdecke ist oft nur flachgründig. Dazwischen finden sich häufig anstehende Felsbänder oder durch Erosion freigelegter Fels. Der Abtrag erfolgt hauptsächlich in Form von Rensen-erosion und eher flachgründigen Rutschungen, aber auch durch Sturzprozesse und im Winter manchmal durch Lawinen.



Abb. 2 Vegetationsbedeckte Hangschutthalde im Meerenbach, Kanton Glarus

Im Gerinnebereich können die Böschungen bei Unterspülung des Hangfusses nachrutschen, wobei das Ausmass stark von der Grösse des betreffenden Ereignisses abhängt. Charakteristisch für die Nachböschungsvorgänge ist die parabelförmige Anbruchsform. Anzahl und Grösse dieser Uferabbrüche werden häufig durch den Verlauf des Gerinnes bestimmt. Sie bilden sich vor allem an den Kurvenaussenseiten (Prallhang).

C) Sturzschutt

Als Folge von Abtragungsprozessen und Verlagerungen kommt es in den Hangfussbereichen und am Fuss von Felswänden zu z.T. mächtigen Lockermaterialansammlungen, die je nach ihrer Form als

- Schutthalden (unterhalb von wenig gegliederten Hängen) oder als
- Schuttkegel (unterhalb von Runsen)

bezeichnet werden.

Grober Blockschutt, der sich als Folge von Felsstürzen ansammelt, ist in vielen Fällen als Geschiebequelle irrelevant, weil er nur in begrenztem Umfang (v. a. kleinere Komponenten) mobilisierbar ist. Er spielt jedoch als Geschiebe dort eine Rolle, wo das Gerinne sehr steil ist oder wo grössere Blöcke durch einen Murgang mobilisiert werden können.

In vielen Fällen wirkt grober Blockschutt im Gerinne eher erosionshemmend.



Abb. 3 Sturzschutthalde am Gandhorn, im Oberlauf des Zälgbachgrabens bei St. Stephan, Berner Oberland

Bei Sturzschutthalden und -kegeln ist eine deutliche Materialsortierung mit zunehmender Korngrösse von oben nach unten erkennbar. Diese Sortierung wird aber oft verwischt, sobald Lawinen, Murgänge und Spülprozesse die Schutthalden überprägen (Abb. 3).

In Ruhephasen kann sich ein Boden bilden und auf der Schuttoberfläche setzt sich Vegetation fest. Bewachsene Halden sind seit längerer Zeit inaktiv (Abb. 4).

D) Bach- und Murschutt

Bach- und Murschutt findet sich im Gerinne selbst, an Erosions- oder Terrassenrändern von älteren Ablagerungen, in Bach- und Murschuttkegeln von seitlichen Zubringern und Steilrunsen sowie im Kegelbereich des Wildbachs.



Abb. 4 Überwachsene Sturzschatthalde im Ri Croaescio, Leventina

Zwischendeponien im Gerinne

Bei Nachlassen der Schleppkraft des Wassers wird Geschiebe abgelagert (Abb. 5). Unter idealen Bedingungen werden bei allmählicher Abnahme der Schleppkraft sukzessive zuerst die groben und dann die feineren Komponenten abgelagert. Bei Wildbächen mit engräumig und kurzzeitig wechselnden Verhältnissen sind jedoch solch ideale Bedingungen nur auf längeren Flachstrecken und im Kegelbereich anzutreffen. Generell sind die Ablagerungen in Wildbachgerinnen relativ ungeordnet. Die jungen Ablagerungen im Gerinne sind ausserdem unverfestigt und leicht wieder mobilisierbar. Charakteristisch ist der meist geringe Anteil an Feinmaterial, weil dieses nach einem Hochwasser aus den Zwischenräumen der gröberen Komponenten wieder weggeschwemmt wird.

Alte, verfestigte Ablagerungen (Erosions- bzw. Terrassenränder)

Ältere Ablagerungen sind gegenüber dem heutigen Gerinne oft erhöht, d.h., das Gerinne hat sich nachträglich wieder eingetieft. Diese Eintiefung ist oft stufenweise unter Bildung von Terrassen erfolgt. An Erosions- und Terrassenrändern lässt sich unter Umständen ein schichtweiser Aufbau erkennen, wobei die Schichten einzelne Ablagerungsphasen repräsentieren.

Solche ältere Bach- und Murablagerungen stellen in vielen Fällen ein bedeutendes Feststoffreservoir dar. Die steilen Terrassenränder sind zwar oft verfestigt und erscheinen recht stabil. Sie können jedoch bei Hochwasserereignissen wiederum erodiert und als Geschiebeherde reaktiviert werden (Uferanbrüche und bei seitlichen Zuflüssen auch Feilenanbrüche, s. weiter unten).

Schwemm- und Murkegel

Schwemmkegel zeigen einige typische Merkmale:

- gerundetes Material
- Korngrössensortierung (oben gröber, unten feiner)
- konkaves Längsprofil
- vergleichsweise ruhige und ausgeglichene Oberfläche.

Als Murkegel wird eine Ablagerungsform bezeichnet, welche schubweise aufgebaut wird. Erkennungsmerkmale sind:

- inhomogenes Material, nur teilweise gerundet (vielfach nur kantengerundet)
- kaum erkennbare Korngrössensortierung, weder in vertikaler noch horizontaler Richtung
- konvexes Längsprofil
- gewellte Oberfläche, verursacht durch oft vom Kegelhals ausgehende Wülste, welche mehr oder weniger parallel der Falllinie folgen
- und im Vergleich zum eigentlichen Schwemmkegel grösseres Gefälle.

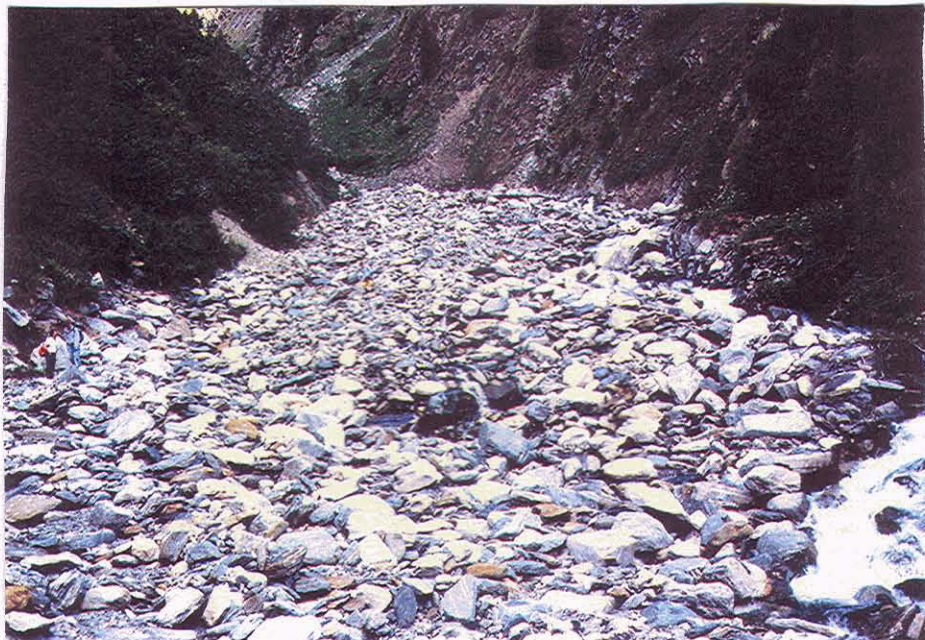


Abb. 5 Zwischendeponien im Gerinne, Ri di Bedretto, Bedrettal, Tessin

Eine Unterscheidung im Gelände ist oft schwierig, weil sich die beiden Formen gegenseitig überprägen können. In manchen Fällen können auch noch Sturzprozesse zur Formenbildung beigetragen haben.

Viele Schwemmkegel sind noch heute in Entwicklung begriffen, während andere seit langem zum Stillstand gekommen sind. Solche relikte Schwemmkegel sind dadurch erkennbar, dass sich Fliessgewässer zum Teil beträchtlich in sie eingetieft haben.

Schwemmkegel bilden sich entweder bei der Einmündung in den Vorfluter oder am Talausgang, wo die Gewässer infolge des reduzierten Gefälles und der Ausweitung der Talsohle an Schleppkraft verlieren und einen beträchtlichen Teil ihrer Fracht ablagern.

Bei Hochwasser stellen alte und junge Schwemmkegel oft relevante Geschiebequellen dar, wobei jüngere Ablagerungen in der Regel weniger verfestigt und somit leichter mobilisierbar sind. Relikte Kegel spielen als Feststoffherd eine grössere Rolle. Einerseits hat sich das Gefälle des Gerinnes durch die Eintiefung erhöht, andererseits werden durch die Eintiefung entstandene Böschungen leicht erodiert.

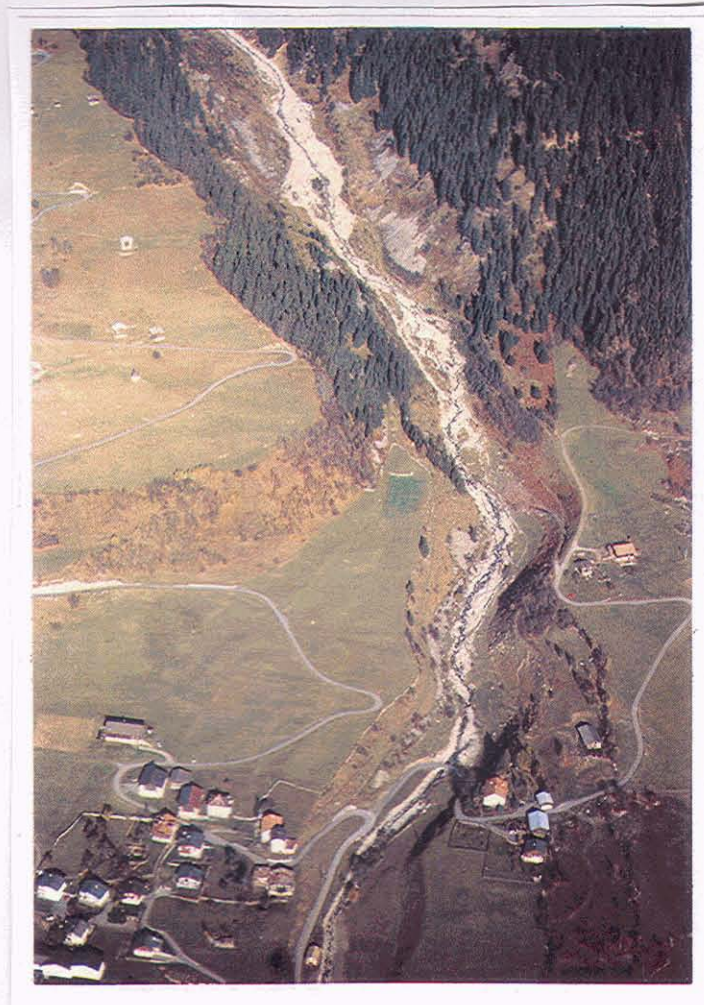


Abb. 6 Erosionsränder im Val Rabiis, Vorderrheintal

1.3 Prozesse der Feststoffmobilisation

Im wesentlichen sind folgende Prozesse an der Feststoffmobilisation resp. der Feststofflieferung in das Gerinne beteiligt:

- Erosion (Tiefenerosion, Seitenerosion, Runsenerosion, Erosion von Zwischendeponien im Gerinnebereich) und Materialverlagerung durch Hochwasser bzw. durch Murgänge
- Abtrag und Materialverlagerung durch Rutschungen
- Verlagerung von Material durch Sturzprozesse (Felssturz und Steinschlag)
- Materialverlagerung durch Lawinen (Tab. 1).

Flachgründig wirksame Prozesse wie allgemeine Hangdenudation (Rillenerosion und Flächenspülung) sind für den längerfristigen Feststoffhaushalt und weniger für die Vorgänge direkt während eines Wildbachereignisses von Bedeutung. Sie werden deshalb hier nicht speziell berücksichtigt.

Einige geschiebeliefernde Prozesse führen zu charakteristischen Anbruchsformen, aus welchen umgekehrt Rückschlüsse auf den Entstehungsprozess möglich sind. Jeder Anbruch kann sich auf verschiedene Art entwickeln:

- kontinuierliche Freisetzung von Feststoffen (vor allem Verwitterungsprozesse)

- Expansion (räumliche Ausdehnung durch weitere Aktivität des ursprünglichen Prozesses oder durch überprägende Prozesse)
- Beruhigung (entweder 'definitive' Beruhigung infolge stabilisierender Vorgänge, z.B. nach dem Abtransport praktisch sämtlichen mobilisierbaren Lockermaterials, oder Übergang zu einem 'schlafenden', oft wieder vegetationsbedeckten Anbruch, der im Laufe der Zeit wieder aktiviert werden kann).

A) Prozesse im Gerinne

Wenn die angreifenden Kräfte der Wasser- und Feststoffmassen grösser sind als die Widerstandskraft der Bachsohle oder der Böschung, beginnt die Erosion.

Das Ausmass der Erosion wird durch verschiedene, z.T. miteinander gekoppelte Faktoren gesteuert:

- 1) Gerinnegeometrie. Hier sind einerseits das Längsprofil mit Sohlengefälle und Lage der lokalen Erosionsbasen von Bedeutung, andererseits die Ausprägung des Querprofils.
- 2) Widerstandsfähigkeit der Bachsohle und der Böschungen
- 3) Wasserführung (Abflussmenge und Fliessgeschwindigkeit)
- 4) Geschiebeführung, wobei hier der Geschiebeanteil sowie Härte und Korngrössen des mitgeführten Geschiebes eine Rolle spielen.
- 5) Feststoffaufnahmefähigkeit eines Murganges.

Die Erosionsform an den Einhängen ergibt sich aus den Faktoren:

- Lage (z. B. Prallhang)
- Form und Neigung der Einhänge
- Struktur, Materialeigenschaften und Mächtigkeit des die Einhänge bildenden Substrats
- Bodenwasserhaushalt
- evtl. Schutzwirkung der Vegetation.

Tiefenerosion

Befindet sich ein Gerinne oberhalb des Gleichgewichtsgefälles, so überwiegt auf lange Sicht die Tiefenerosion. Bei der Tiefenerosion erfolgt die mechanische Abtragsleistung durch

- Erosionskraft der Murgänge
- Wasserwalzen und Geschiebetransport am Grund. Die Abtragsleistung ist umso grösser, je unregelmässiger die Wasserführung ist und je unregelmässiger sich der Stromstrich bei Hochwasser verlagert. Entscheidend ist somit das "Pulsieren" des Abflusses und des Geschiebetransports.

In steilen Gerinnen können durch Unterkolkung auch grosse Blöcke ins Kollern gebracht werden, für welche die Schleppkraft des Wassers bzw. des Wasser-/Geschiebegemisches allein nicht ausreichen würde.

Seitenerosion

Seitenerosion ist im wesentlichen die seitliche Abtragung von Ufer- und Hangmassen. Seitenerosion im engeren Sinne spielt in Wildbächen eine vergleichsweise untergeordnete Rolle. Sie erfolgt meistens nur punktuell. Vielfach brechen Böschungen aufgrund einer starken Sohleneintiefung und nicht infolge eigentlicher Seitenerosion ein. So können Tiefen- und Seitenerosion in Wildbächen oft nur schwer auseinander gehalten werden.

Tab. 1 Geschiebelieferung und charakteristische Anbruchsformen

Geschiebelieferung durch:	Prozess	Anbruchsform
1) Fluviale Erosion	Tiefenerosion	Feilenanbruch
		Keilanbruch
	Seitenerosion	Uferanbruch
	Runsenerosion	Runsenanbruch
2) Rutschungs- und Kriechbewegungen	Rutschung – Rotationsrutschung – Translationsrutschung	
		Rotationsanbruch
		Translationsanbruch
	Felsrutschung	
	Sackung	
	Kriechbewegungen	
3) Sturzprozesse	Steinschlag	
	Felssturz	
4) Lawinen	Schnee- und Lawinenschurf	

Zu einseitigem Abtrag kommt es an Prallstellen, die durch Krümmungen des Wasserlaufs, durch die Ablenkung des Hauptgerinnes wegen Hindernissen (Felsnasen, Blöcke, Geschiebeablagerungen, Bäume usw.) oder durch den Geschiebeeinstoss von Seitenbächen am Ufer oder Einhang entstehen.

Uferanbrüche (Abb. 7) können nicht immer eindeutig einer Erosionsform zugeordnet werden. Sie entstehen oft in typischer Prallhanglage. Oft zeigen sie eine parabolische Form und sind flachgründig. Sie sind meist eine Folge seitlicher wie in die Tiefe gerichteter Erosion. Uferanbrüche sind zudem nicht nur in Lockermaterial, sondern auch in veränderlich-festen Gesteinen zu finden.

Der Abbruch erfolgt entweder entlang von präformierten Diskontinuitätsflächen (Felsoberfläche, Schichtflächen, Klüften usw.) oder an sich spontan bildenden Gleitflächen. Selbst Gesteine mit etwas kräftigerem Zusammenhalt lösen sich oft an neu gebildeten Bruchflächen ab und bilden felsige Uferbläiken.

Die Erosionsmächtigkeit hängt von der Erosionskraft des Wassers oder des Murgangs, der Lage des Geschiebeherdes (z.B. Prallufer) und der Erodierbarkeit des Substrats ab. Wasseraustritte und Vernässungen begünstigen die Bildung von Uferanbrüchen. Die Ausdehnung der Anbrüche ist sehr unterschiedlich (Meter- bis Dekameterbereich). Sie hängt von der allgemeinen Geländekonfiguration, von der Böschungsgeometrie und vom Aufbau des Untergrunds ab.

Bei Böschungen älterer Ablagerungen reichen die Uferanbrüche meist bis an die Oberkante. Es entstehen sichelförmige, mehr langgestreckte als hohe Uferanbrüche, die sich oft aneinanderreihen, wie dies beispielsweise an schlecht bewachsenen Schotterterrassen in höher gelegenen Zonen gut zu beobachten ist.

An steilen, gleichmässig geneigten Hängen sind die Uferanbrüche hingegen oft höher als lang und weisen z.T. Ansätze zur Runsenbildung auf.



Abb. 7 Uferanbruch im Ri di Cavanna, Ereignis 1987

Die Weiterentwicklung der Uferanbrüche läuft folgendermassen ab: In Ruhezeiten stellt sich durch Abbröckeln von Gesteinskomponenten, durch Flächenspülung, durch Runsenerosion und kleinere Nachrutschungen sukzessive der natürliche Böschungswinkel ein. Das abgetragene Material sammelt sich im Gerinne an. Nach und nach kann auch die Vegetation wieder Fuss fassen. Im Hochwasserfall kann der Geschiebeherd erneut angegriffen werden und der Prozess beginnt von neuem. Häufig kommt es zu einem ständigen Wechsel zwischen Erosion durch das Gewässer und Nachrutschungen.

Die Relevanz von Uferanbrüchen als Geschiebeherd hängt von deren Grösse und der Stabilität der angegriffenen Hangmassen ab. Kommt es zur Unterspülung stabiler Hangmassen, so brechen meist nur relativ geringmächtige Materialpakete ab. Sind jedoch die erodierten Hangmassen labil, so kann sich durch die Seitenerosion eine Rutschung lösen, die grosse Geschiebemengen in das Gerinne liefern und dort allenfalls einen temporären Damm bilden kann.

Bei extremen Hochwassern verbreitert der Bach häufig beidseitig sein Bett.

Runsenerosion

Als Runsenerosion wird Tiefenerosion am steilen Hang, meist in Verbindung mit einer bereits existierenden Rinne, bezeichnet. Viele Runsen sind wesentlich durch Schurf von Muren, Steinschlag und Lawinen geprägt. Die Bildung von Runsen wird hauptsächlich vom Hangrelief (Mulden, Mikrotäler, tektonische Linien usw.) beeinflusst. Auch Neigung, Hanglänge, Vegetation, Wassermenge und das Verhalten des Substrates gegenüber dem angreifenden Wasser sind entscheidend. Als Feststoffherde sind sie für die vorliegende Fragestellung eher von untergeordneter Bedeutung, insbesondere weil die meisten Runsen in der Regel klein sind (geringe mobilisierbare Feststoffmengen). Besonders Runsen auf Fels sind als Geschiebeherd praktisch ohne Bedeutung (Abb. 16). Hingegen funktionieren sie häufig als Transportweg für Feststoffe aus höher gelegenen Geschiebeherden.

Runsenanbrüche

Die grössten und wichtigsten Runsenanbrüche befinden sich in mächtigen Schuttmassen. Es handelt sich hierbei um die Anrissstellen von Runsen in Bachkegeln, Schutthalden/-kegeln und in Moränen,

die durch plötzliche Eintiefung bei Hochwasser oder Murgängen entstehen. Oft durchziehen mehrere solcher Runsen die Schuttkörper.

Sehr häufig kann Runsenbildung in der Verlängerung oder in den Anbruchflächen von Rutschungen (meist Rotationsrutschungen) beobachtet werden. In solchen Flächen setzt mit der Rutschung oder unmittelbar danach Tiefenerosion ein.

Wenn sich Runsen in Lockermaterial gebildet haben, können sie bei grossen Niederschlagsereignissen weiter aufreissen und zu bedeutenden Geschiebeherden werden. Besonders gefährlich ist die Situation, wenn sich in solchen Runsen Murgänge entwickeln. Diese können unter Umständen zu einer Verstopfung des Hauptgerinnes führen. Oft befinden sich die steilen Runsen jedoch an felsigen Bergflanken und können sich deshalb nicht weiter entwickeln.

B) Rutschungs- und Kriechbewegungen im Hangbereich

Im folgenden werden Prozesse beschrieben, welche primär durch die Schwerkraft ausgelöst werden. Es handelt sich um die Bewegung von Lockermaterial und/oder Festgestein an mässig geneigten bis steilen Böschungen. Transportmedien spielen eine untergeordnete Rolle.

Rutschungen

Rutschungen sind hangabwärts gerichtete Bewegungen von Hangteilen aus Fels, Lockermaterial oder Boden. Sie finden an mässig geneigten bis steilen Böschungen statt. Die Gleitbewegungen sind direkt wahrnehmbar.

Die Art der Bewegung ist dabei sehr unterschiedlich: Von einer als Block bewegten Masse, welche in der eigenen Anbruchnische stecken bleibt, sind bis zum Übergang zu Murgängen verschiedene Erscheinungsformen zu beobachten.

Es wird unterschieden zwischen Translations- und Rotationsrutschungen:

- Translationsrutschungen im Fels, in Lockermaterial oder in Böden
Der Scherbruch erfolgt entlang einer präformierten Scherfläche (Diskontinuitätsfläche irgendwelcher Art, z.B. Schichtgrenze). Unter dem Einfluss der Schwerkraft findet eine translatorische Gleitbewegung entlang der Scherfläche statt. Bruch und Bewegung können auch entlang von mehreren Diskontinuitätsflächen gleichzeitig erfolgen. Am häufigsten rutscht die lockere Rasendecke auf dem dichteren Unterboden ab oder die Verwitterungsdecke gleitet über dem anstehenden Fels ab.
- Rotationsrutschungen im Fels oder im Lockermaterial
Die Gleitbewegung erfolgt entlang von konkav gekrümmten Scherflächen, die sich beim Bruch spontan gebildet haben. Dabei entspricht die Bewegung im oberen Teil oft einer Sackungsbewegung. Vielfach werden durch einen ersten Anbruch weitere Anbrüche ausgelöst.
Als häufiger Sonderfall der Rotationsrutschungen im Lockermaterial treten Anbrüche auf, die durch Druckanstieg des Porenwassers ausgelöst werden ('Hangexplosionen', hydraulischer Grundbruch). Oft erfolgt in diesem Fall eine sofortige Verflüssigung des Rutschkörpers, welcher als Hangmure abfließt.

Ferner wird unterschieden zwischen:

- flachgründigen Rutschungen mit einer Anrissmächtigkeit von weniger als ca. 2 m
- mittelgründigen Rutschungen mit einer Anrissmächtigkeit zwischen ca. 2 und 10 m
- tiefgründigen Rutschungen mit einer Anrissmächtigkeit grösser als ca. 10 m.

Diese Abgrenzung wird weitgehend damit begründet, dass flachgründige Rutschungen im Bereich des Wurzelhorizonts von Bäumen mit verhältnismässig geringem Aufwand saniert werden können (z.B. biologisch/forstliche Massnahmen). Dort wo die Wurzeln den Boden zu durchdringen vermögen, finden weniger Rutschungen statt. Tiefgründige Rutschungen dagegen sind - wenn überhaupt - nur mit hohem technischem Aufwand stabilisierbar.

Entsprechend der Unterscheidung von Translations- und Rotationsrutschungen können Translations- und Rotationsanbrüche unterschieden werden.

Translationsanbruch

Translationsanbrüche weisen an der oberen Begrenzung (Bereich der Hauptablösungsfläche und der Flanken) oft eine rechteckige, seltener eine bogenförmige Form auf.

Bei kleinen Anbrüchen kann die Vegetation schnell wieder Fuss fassen. Kleine Anbrüche können aber auch durch Runsenerosion, Flächenspülung, evtl. Schnee- und Lawinenschurf umgeformt werden. Bei tiefgründigen Translationsanbrüchen besteht die Gefahr von Nachrutschungen.

Während flachgründige Translationsanbrüche als Geschiebeherde häufig vorkommen, spielen sie im Hinblick auf die Feststofflieferung eine vergleichsweise untergeordnete Rolle. Nur durch tiefgründige Anbrüche werden bedeutende Feststoffkubaturen bewegt.

Rotationsanbruch

Die Anbruchflächen der meistens tiefgründigen Rotationsrutschungen können muschelförmig oder unregelmässig ausgebildet sein.

Die losgelöste Masse legt im Normalfall nur einen ganz kurzen Weg zurück. Sie wird noch innerhalb oder unmittelbar unterhalb des Abbruchgebietes abgelagert, falls nicht der Übergang in eine Hangmure erfolgt. Von der Gleitfläche sieht man oft nicht viel.

Die Tiefgründigkeit und die ausgeprägt konkave Form der Rotationsanbrüche ermöglichen verschiedenartige und oft sehr ausgeprägte sekundäre Abtragungsprozesse, wie das Nachrutschen und Nachbrechen der Böschungen sowie Runsenerosion.

Oft sind alle drei Prozesse an der Weiterentwicklung beteiligt, wobei je nach Entwicklungsstadium, Lage des Geschiebeherdes und Substrateigenschaften der eine oder andere Prozess vorherrscht.

In leicht beweglichen oder vernässten Lockermassen beruhigen sich die Schuttmassen nur sehr schwer. Kleinere Rutschungen wiederholen sich in grösserer Zahl und in vergleichsweise kurzen zeitlichen Abständen. Der Geschiebeherd wächst an. Es kann oft sehr lange dauern, bis sich in der Böschung der Ruhewinkel einstellt.

Rotationsanbrüche sind oft sehr ergiebige Feststoffherde. Sie liefern bedeutende Mengen an Material in den Bach, was häufig zu Gerinneverstopfungen und in der Folge zu Murgängen führen kann.

Felsrutschungen

Unter einer Felsrutschung versteht man ein langsames Abrutschen von grossen kompakten Gesteinspaketen auf eher flacher Gleitbahn, ohne dass die ursprüngliche Lagerung wesentlich gestört wird.

Die Bedeutung von Felsrutschungen für die Geschiebelieferung liegt darin, dass Fels zerfällt und das Material in Richtung der Gerinne verfrachtet wird. Dieses Material kann das Gerinne verstopfen. Durch den umfangreichen Geschiebeeintrag durch weitere Rutschungs- und Kriechbewegungen kann ein Murgang entstehen.

Sackungen

Als Sackung wird eine Massenbewegung im Fels umschrieben, die nicht entlang von präformierten Gleitflächen stattfindet, eine deutliche Vertikalkomponente aufweist und bei welcher das bewegte Material oft im Schichtverband verbleibt. Der Fels wird durch die Sackungsbewegung zerbrochen und zerklüftet. Beim Anriss finden sich oft Nackentälchen, in denen sich Wasser ansammeln kann.

Kriechbewegungen/Talzuschiebe

Talzuschiebe können als "...grossräumige, langsame, unmittelbar nicht wahrnehmbare, steifplastische, tiefgreifende Kriechbewegungen von Felsgesteinen unter dem Einfluss der Gravitation zum Tal hin, wobei oberflächennahe Lockermaterialien und die Vegetationsdecke mitbewegt werden" verstanden werden (Bunza et al. 1976).

Der untere Hangteil ist infolge des Massenzuwachses häufig konvex aufgewölbt.

C) Sturzprozesse

Steinschlag und Felssturz sind reine gravitative Prozesse. Nachdem das Gesteinsmaterial abgebrochen ist, legt es den grössten Teil des Weges in der Luft zurück. Zwischen den einzelnen Komponenten besteht nur eine geringe Interaktion. Der Prozess dauert oft nur Sekunden oder wenige Minuten.

Als Steinschlag werden einzelne herabstürzende Felsbrocken bezeichnet. Ihr Korndurchmesser wird auf maximal 0.5 Meter begrenzt.

Als Felssturz werden abstürzende, aus nicht zusammenhängenden Blöcken bestehende Felsmassen bezeichnet. Ihr Korndurchmesser beträgt über 0.5 Meter.

Sturzart und Anbruchsformen hängen in erster Linie von den geologisch-tektonischen Gegebenheiten und den geomechanischen Eigenschaften der anstehenden Gesteine ab. Auslösende Faktoren sind neben der physikalischen und chemischen Verwitterung insbesondere Frostschiebe, Kluftwasserschiebe, Porenwasserdruck und Wurzeldruck. Felsstürze entstehen häufig in glazialen Tälern, in denen durch die Belastung und Entlastung durch die Gletscher an den Talflanken hangparallele Kluftsysteme entstanden sind. Wesentlichen Anteil an der Entstehung von Felsstürzen hat häufig der Kluftwasserschiebe. Dieser nimmt u.a. durch grosse Niederschläge oder viel Schmelzwasser zu. Auch bei Eisbildung im oberflächennahen Bereich tritt er häufig auf, da dann die Drainagewirkung der Klüfte wegfällt. Felsstürze können aber auch durch reinen Porenwasserdruck entstehen.

Sturzprozesse erzeugen keine typischen Anbruchsformen. Alle Felsbänder und -wände sind potentielle Orte für Sturzprozesse.

Sturzprozesse sind für die Geschiebelieferung während eines Ereignisses meistens wenig relevant. Das Material stürzt in vielen Fällen auch nicht direkt in das Gerinne, sondern häuft sich am Fusse der Felswand als Schutthalde oder -kegel an. Diese Ablagerungen sind für die Feststofffracht der Bäche erst wichtig, wenn sie erodiert werden.

D) Schnee und Lawinen

Durch Gleitschnee und Lawinen wird im Winter Lockermaterial aufgeschürft und abgetragen. Es entstehen dadurch flachgründige Blaiken. Diese können sich durch sekundäre Prozesse wie beispielsweise Wasser- und Winderosion längerfristig weiterentwickeln. In ruhigeren Phasen wächst wieder Vegetation nach. Blaiken sind als Geschiebeherde von eher geringer Bedeutung.

Lawinen, welche einem Gerinne folgen, sind in der Lage, Gesteinsmaterial grösseren Ausmasses zu transportieren. Häufig ist dieses Material mit viel Holz vermischt, welches aus den Böschungen mitgerissen worden ist. Lawinen aus dem Hang können bei entsprechenden Bedingungen ebenfalls Feststoffe mobilisieren. Ähnlich wie bei Hangmurgängen entscheidet das Längenprofil des Hanges, ob das Material den Wildbach erreichen wird.

1.4 Relevanz der Geschiebeherde während des Ereignisses

Bei Wildbachereignissen sind teilweise andere feststoffliefernde Prozesse massgebend als beim langjährigen mittleren Feststoffabtrag. Die während eines Wildbachereignisses mobilisierten Feststoffe stammen in der Regel aus Geschiebeherden im unmittelbaren Gerinnebereich oder aus den Hängen des Einzugsgebietes. Hinsichtlich Feststoffproduktion und -lieferung können verschiedene

Verwitterungsprozesse, Anbruchsformen, Massenbewegungs- und Erosionsprozesse unterschieden werden.

Eine vereinfachende Darstellung der geschiebeliefernden Vorgänge in bezug auf ein Wildbacher-
eignis findet sich in Fig. 2.

A) Bedeutung der Geologie für die Vorgänge der Feststofflieferung und -verlagerung

Die geologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet haben einen grossen Einfluss auf die Wildbachtätigkeit. So wird die heutige Ausprägung des Reliefs eines Einzugsgebietes und des Längenprofils eines Fließgewässers weitgehend durch Anordnung und Beschaffenheit der verschiedenen Gesteinsschichten bestimmt. Gletschertätigkeit und langjährige Erosion durch Wasser und Hangprozesse können Relief und Längenprofil jedoch weiter geformt und überprägt haben (z. B. Karschwellen, Tobelbildung). Sehr hartes Gestein bildet oft Erosionsbasen, hinter welchen sich im Laufe der Zeit bedeutende Geschiebemassen ansammeln können. Ferner spielen folgende Faktoren eine Rolle:

- im Hinblick auf die Geschiebeaufbereitung: Art sowie Zustand der Festgesteine (Härte, Struktur, Verwitterungsgrad, Klüftung eines Felsens)
- für den Feststoffnachschub: Art und Zusammensetzung des Lockermaterials (z. B. Verfestigungsgrad und Korngrößenverteilung einer Moräne)
- im Zusammenhang mit der Hangstabilität: Vorhandensein wasserundurchlässiger Gesteinsschichten (z. B. Opalinus-Ton, Phyllite) als Gleithorizont.

Hydrogeologische Merkmale sind ferner ein weiterer entscheidender Faktor für Hangstabilität und Erosionstätigkeit:

- Oberflächennahe Stauschichten können raschen, oberflächennahen Abfluss bewirken.
- Durch vorübergehenden Wasserrückhalt während eines Wildbachereignisses kann die Speicherfunktion des Bodens gleichzeitig eine Dämpfung wie auch eine Verzögerung der Hochwasserspitze bewirken. Dies kann die Feststoffmobilisierung reduzieren.

Die Stabilität der Sohle ist schliesslich - abgesehen von der Wassermenge - abhängig von der Korngrößenverteilung, welche ihrerseits durch geologisch-lithologische Faktoren bestimmt wird.

B) Feststofflieferung in das Gerinne

Für die ereignisbezogene Feststofflieferung sind Geschiebeherde relevant, welche bestimmte Eigenschaften aufweisen. Der Beitrag der einzelnen Geschiebeherde an die gesamte mobilisierte Feststoffkubatur hängt vor allem von der Materialbeschaffenheit sowie der Lage in bezug auf das Gerinne ab. Diese beiden Faktoren bestimmen auch den Zeitpunkt der Feststofflieferung in das Gerinne (vgl. Lehmann 1993).

C) Materialbeschaffenheit

Das Gesteinsmaterial wird in folgende Gruppen unterteilt:

1) Fels

Felsarten, die sich bei ihrer Benetzung gegenüber dem Angriff des Wassers resistent verhalten.

2) Veränderlichfester Fels

Felsgesteine, die gegenüber der Oberflächenenergie von benetzendem Wasser empfindlich sind.

3) Lockergesteine

Unterschieden werden

- rezente und eiszeitliche Moränen (Grundmoränen, Moränenwälle) und weitere eiszeitliche Sedimente (eiszeitliche Talverfüllungen),
- Hangschutt, Verwitterungsschutt, Schutt aus Denudation durch verschiedene Prozesse, z.B. Lawinen und vor allem Sturzschnitt (Schutthalden und -kegel) sowie
- Bach- und Murschutt, Terrassenschotter, Zwischendeponien im Gerinne, Schwemmkegel.

4) Böden

Oberste, von Wasser, Luft und Organismen durchsetzte Erdschichten, die gewöhnlich in stofflich und farblich differenzierte Horizonte gegliedert sind.

Vor allem die beiden letztgenannten Materialklassen sind von Bedeutung. Die dazu notwendigen Prozesse der Massenverlagerung (Rutschungen, Murgänge, Hangunterspülungen usw.) werden meist von Niederschlägen und Hochwassern ausgelöst.

D) Lage in bezug auf das Hauptgerinne

Die Lage der Feststoffherde in bezug auf das Gerinne entscheidet darüber, ob die Lieferung der Feststoffe ins Gerinne 'direkt' oder 'indirekt' erfolgt (Fig. 2 und 3):

- **direkt** Für Geschiebeherde im Gerinnebereich, d.h. im direkten Einflussbereich des Hochwassers.
Die Mobilisation von Feststoffen ist an der betrachteten Stelle nicht an einen bestimmten auslösenden Niederschlag gebunden. Sie wird durch die Schleppkraft des Hochwassers gesteuert. Geschiebeherde im direkten Einflussbereich des Gerinnes sind bei Hochwasser 'sicher relevant'.
- **Indirekt** Für Geschiebeherde ausserhalb des Gerinnebereichs
 - Der Feststoffeintrag erfolgt kanalisiert via Runsen. Geschiebeherde, deren Material via Runsen in das Gerinne gelangt, sind bei Hochwasser 'wahrscheinlich relevant'. Die Feststoffe erreichen das Gerinne vor allem dann, wenn sie vom Wasser durch steile und nicht abgetreppte Runsen verlagert werden.
 - Der Feststoffeintrag erfolgt nicht kanalisiert über den freien Hang. Diese Geschiebeherde sind bei Hochwasser 'möglicherweise relevant'. Die Feststoffe erreichen das Gerinne in der Regel über steile Hänge mit einem gestreckten Längsprofil (Fig. 4).

Die Beschaffenheit des Weges zwischen Geschiebeherd und Gerinne spielt somit eine wesentliche Rolle. Je steiler das Gelände und je weniger abgestuft das Längsprofil ist,

- desto grösser ist die Chance, dass Material allein durch gravitative Prozesse ins Gerinne gelangt,
- desto weniger Schleppkraft ist seitens des Wassers notwendig, um Feststoffe ins Gerinne zu verlagern,
- desto grösser ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass Feststoffe vor dem Hochwasser- oder Murgangereignis ins Gerinne gelangt sind.

Wegen der Konzentration der Transportmedien (Wasser, Schnee) sowie dem häufigeren Auftreten von Murgängen bieten Runsen bessere Voraussetzungen für eine häufige Materialverlagerung ins Gerinne als flächenhafte Prozesse wie beispielsweise flachgründige Rutschungen.

E) Zeitpunkt der Feststofflieferung

Die Feststofflieferung kann entweder während des Hochwasserereignisses oder zwischen zwei Hochwassern erfolgen. Der Zeitpunkt der Feststofflieferung in das Gerinne wird - unabhängig vom Niederschlag betrachtet - durch die Materialbeschaffenheit und die Lage des Geschiebeherdes bestimmt (s. Tab. 2).

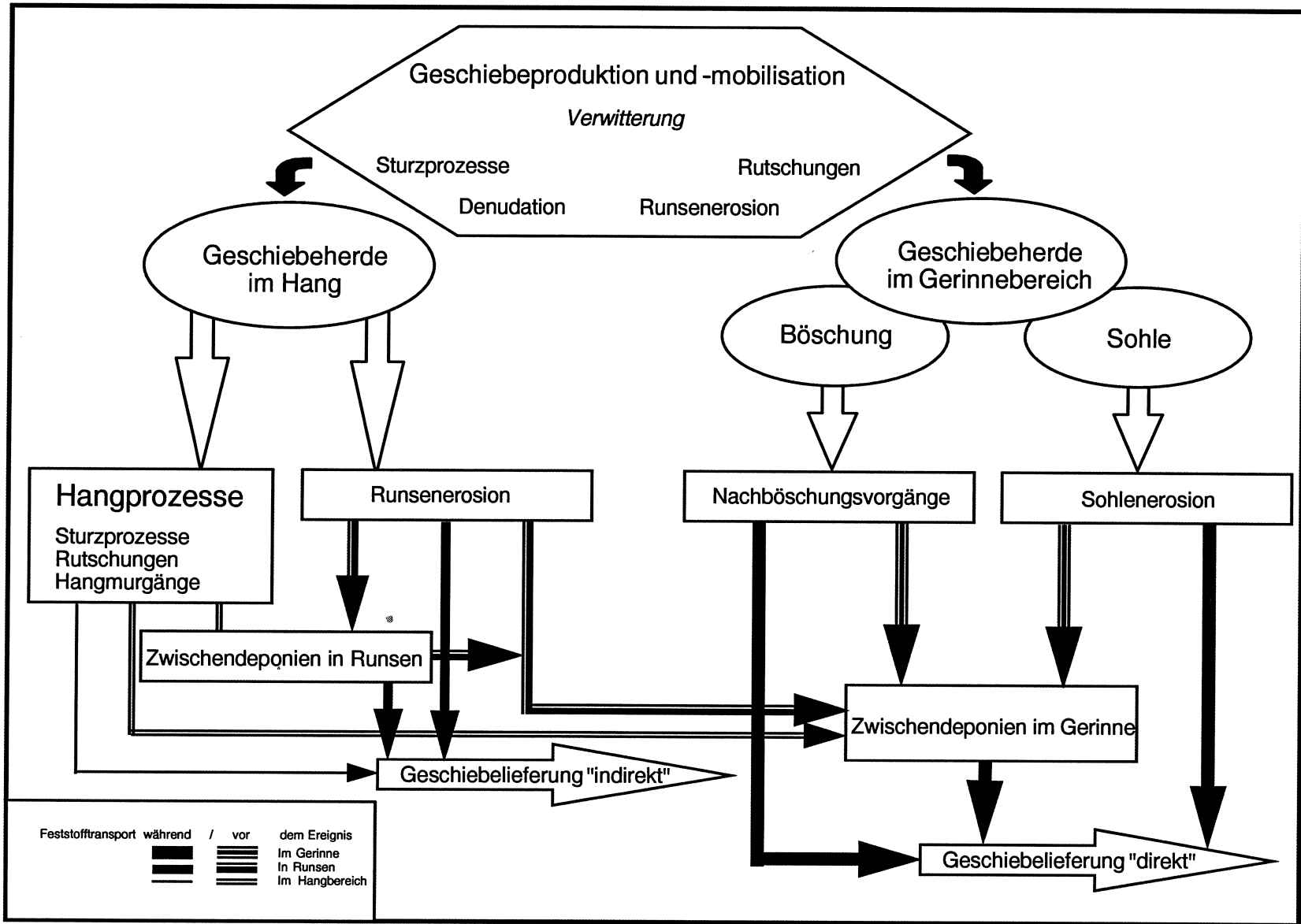


Fig. 2

Systematik der Feststofflieferung in Wildbächen

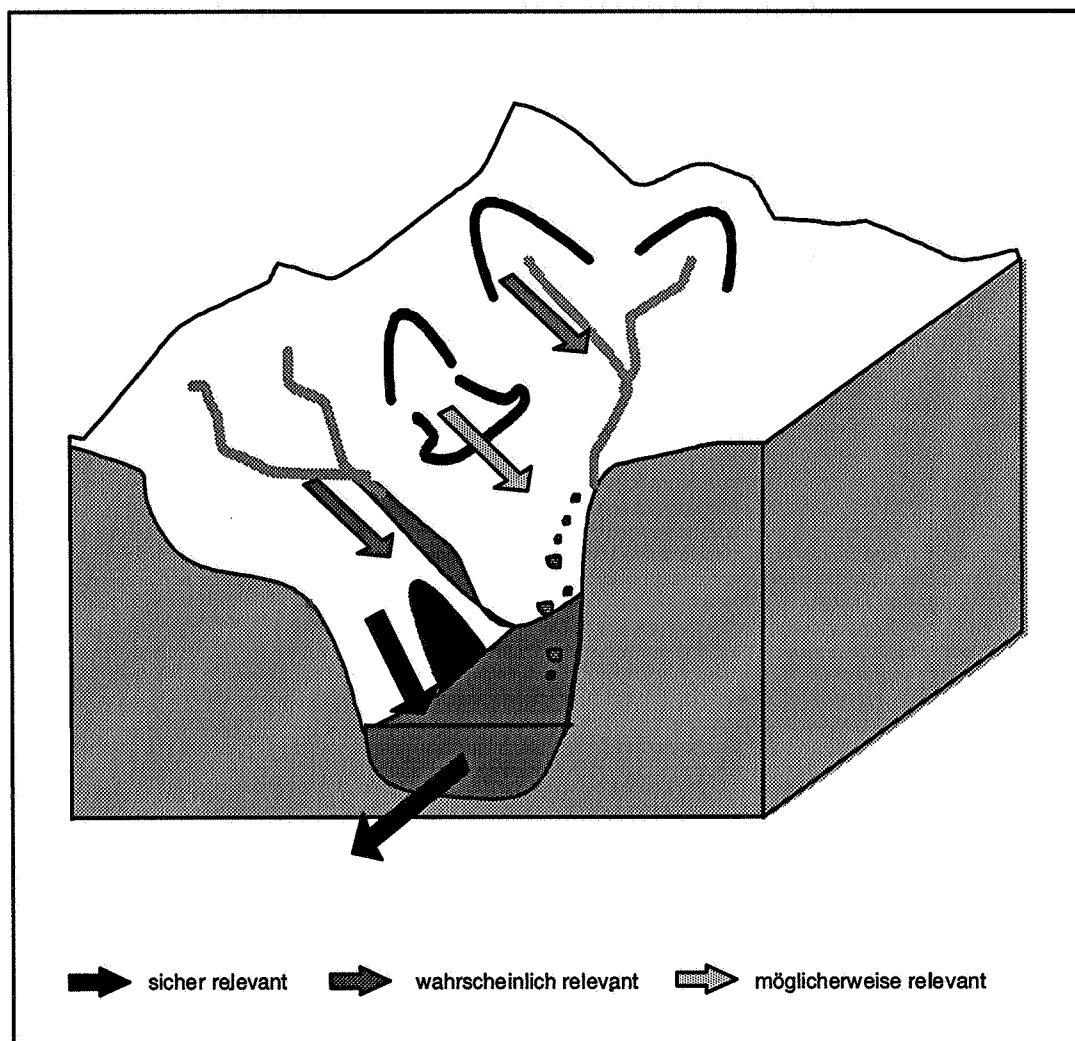


Fig. 3 Relevanz der Geschiebeherde als Funktion ihrer Lage zum Gerinne

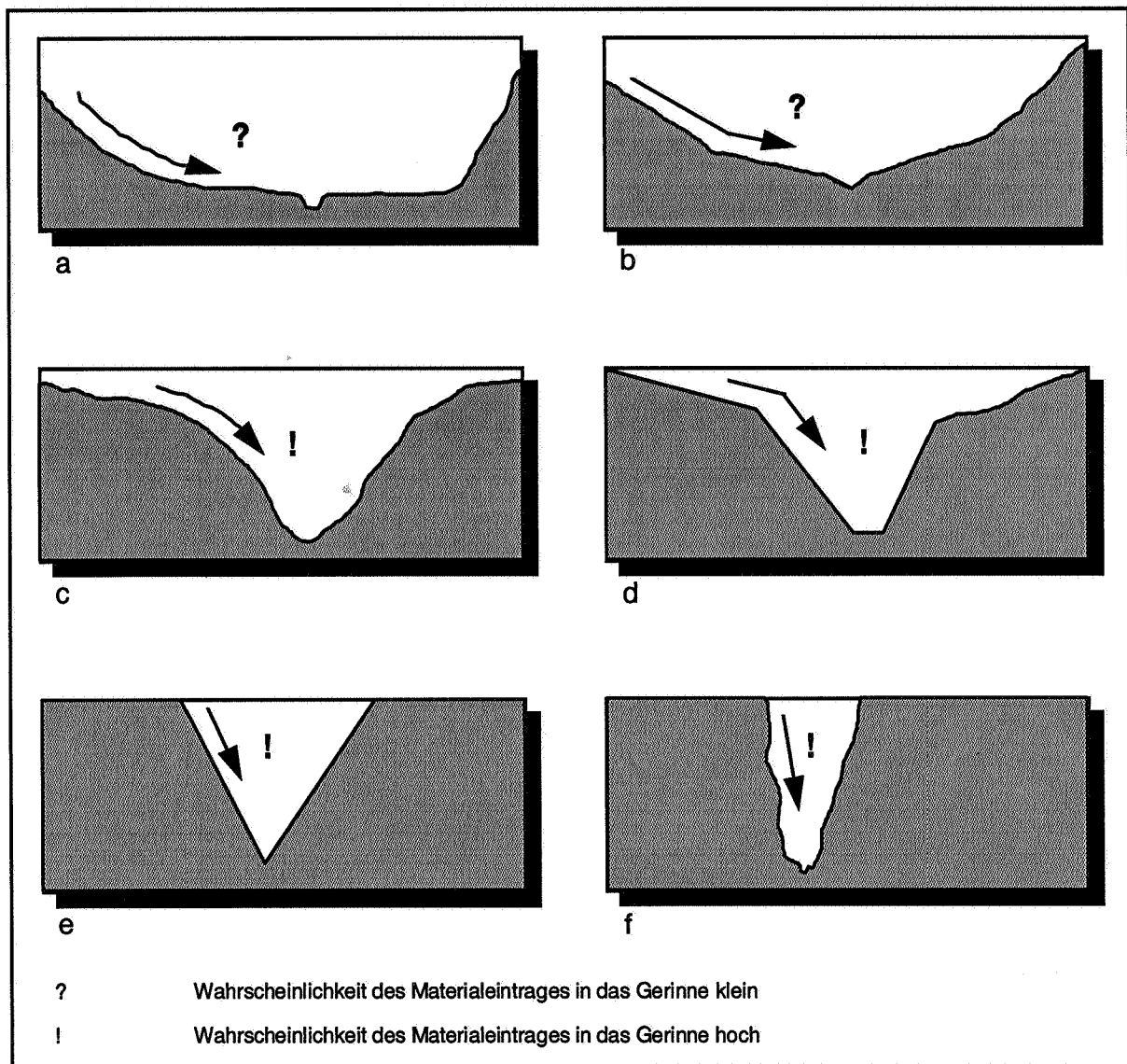
Die besondere Relevanz der gerinnenahen Geschiebeherde ist hervorzuheben. Sohle und Böschungen aus Lockermaterial werden durch das Hochwasser oder einen Murgang immer bzw. oft erodiert. Geschiebeherde aus Fels spielen kaum eine Rolle.

1.5 Fazit für die Beurteilung der Relevanz der Geschiebeherde

Die bewegliche Gerinnesohle ist der wichtigste Feststoffherd. Sobald der kritische Abfluss überschritten wird, gelangt Material in Bewegung. Material jüngerer Ereignisse ist besonders leicht erodierbar, da es weniger verfestigt ist. Sogenannte Zwischenakkumulationen finden sich vorwiegend in Lockermaterial, in geringerem Masse auch in Felsgerinnen.

Da bei hohen Abflüssen praktisch immer Material aus dem Bachbett erodiert wird, ist die Sohle bezüglich Feststofflieferung während des betrachteten Ereignisses *'sicher relevant'*. Art und Beschaffenheit des Lockermaterials bestimmen dabei den Umfang des Feststoffpotentials.

Während eines Wildbachereignisses spielen Geschiebeherde aus Festgestein eine untergeordnete Rolle. Einzelne Komponenten können zwar infolge bereits stark fortgeschrittener Verwitterung durch Niederschläge aus dem Felsverband herausgelöst werden. Diese Kubaturen fallen jedoch kaum ins



- a) allmählicher Energieverlust der Massenbewegung durch stetig abnehmendes Gefälle
- b) abrupter Energieverlust der Massenbewegung infolge Gefällsknick
- c) allmählicher Energiegewinn der Massenbewegung durch stetige Zunahme des Gefälles
- d) plötzlicher Energiegewinn oder Entstehung der Massenbewegung unterhalb der Hangkante
- e) Energieerhaltung der Massenbewegung im steilen Hang
- f) Materialeintrag durch Transformation in eine Sturzbewegung

Fig. 4 Wahrscheinlichkeit des nicht kanalisierten Feststoffeintrags in das Gerinne aus dem Hang

Tab. 2 Zeitpunkt der Feststofflieferung bezogen auf das Hochwasserereignis

Geschiebeherd / Prozess der Feststofflieferung	Lieferung in Zwischenzeiten	Lieferung während des Ereignisses
Sohle aus Lockermaterial	nie	immer
Sohle aus Festgestein	nie	selten
Sohle aus veränderlichfestem Gestein	nie	oft
Nachböschungsvorgänge	selten	oft
Flachgründige Rutschungen	meistens	oft
Tiefgründige Rutschungen	meistens	selten
Felsrutschungen	meistens	selten
Felssturz	meistens	selten
Steinschlag	meistens	selten
Runsenerosion	meistens	oft

Gewicht und können deshalb in der Berechnung vernachlässigt werden. Ausnahmen sind Feststoffherde, welche durch eine Runse mit dem Gerinne verbunden sind. Hier ist mit der Verlagerung von angesammelten Zwischendeponien zu rechnen. Schuttkegel, welche sich am Gerinne unterhalb von Felswänden aufbauen, können teilweise erodiert werden, wobei hier die Grösse des Kegels und seiner Einzelkomponenten zu beachten ist.

Die Relevanz schneller Hangbewegungen (Rutschungen, Murgänge) für das Hauptgerinne hängt ab von der Entfernung des Anrisspunktes zum Gerinne, der Hangneigung, der Art und Zusammensetzung der oberflächennahen Bodenschichten sowie von Feuchte- und Vegetationsverhältnissen.

Häufig treten Anbrüche auf, die durch Druckanstieg des Porenwassers ausgelöst werden (hydraulischer Grundbruch oder 'Hangexplosionen'). Oft erfolgt in diesem Fall eine sofortige Verflüssigung des Rutschkörpers, so dass ein Murgang entsteht. Solche Vorgänge konnten im Zusammenhang mit den Unwettern 1987 beobachtet werden (Ri di Cavanna, August 1987; Plaunca, Juli 1987). Dieser Prozess ist allerdings nur dann von Bedeutung, wenn die Feststoffe das Gerinne tatsächlich erreichen. Als Faustregel kann eine Mindestneigung von 30° für die Fortsetzung selbständiger Hangprozesse angenommen werden, sofern der Anrisspunkt nicht zu weit vom Gerinne entfernt ist. In konvexen Hangbereichen kann sich die Bewegung unter zusätzlicher Feststoffaufnahme und unter Bildung eines Murganges ins Gerinne fortsetzen. Bei sehr flachgründigen Bodenrutschungen hingegen ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Bewegung auch bei steilem Gelände nur wenige Meter anhält. Praktisch jeder flächenhafte Prozess in Runsen kann in einen Murgang übergehen.

1.6 Feststofftransport im Gerinne

1.6.1 Sohlenzustand

Vorgänge wie Erosion, Transport und Ablagerung von Feststoffen können während eines grösseren Ereignisses kurzfristig extreme Ausmasse annehmen und die langfristige Entwicklung eines Bachsystems nachhaltig beeinflussen.

Die Prozesse der Feststoffverlagerung im Gerinne verlaufen örtlich sehr verschieden und werden von vielen weiteren Steuergrößen beeinflusst. Entlang des Längsprofils eines Baches kommen verschiedene Sohlenzustände und Ausprägungen des Gerinnes vor. Diese beeinflussen das örtliche Fliess- und somit auch das Transportverhalten des Baches.

Der *langfristige Sohlenzustand* in Wildbächen ist von verschiedenen Parametern abhängig:

- geologischer Untergrund
- Gefälle
- Gerinnegeometrie
- Menge und Zusammensetzung des Feststoffeintrags
- Abfluss
- anthropogene Eingriffe.

Es lassen sich verschiedene langfristige Sohlenzustände und -entwicklungen beobachten.

A) Sohle in Eintiefung

Bei Eintiefungsstrecken ist die Transportfähigkeit des Wildbachs langfristig nicht ausgelastet. Eine Eintiefung der Sohle tritt ein, sobald das abgetragene Material nicht oder nur unvollständig ersetzt wird. Dabei spielt es keine Rolle, ob ein Mangel an Feststoffnachschub aus dem Hangbereich besteht oder ob aus dem Sohlenmaterial von weiter bachaufwärts liegenden Strecken zu wenig Material nachgeliefert wird.

Je nach Beschaffenheit der Sohle tieft sich das Gerinne unterschiedlich schnell ein. Die Eintiefung schreitet rascher fort, solange die Sohle über keine genügend resistente Deckschicht verfügt, welche eine Eintiefung verhindert.

Eintiefungsstrecken lassen sich u.a. an einem V-förmigen Gerinnequerschnitt erkennen. Diese charakteristischen Bachquerschnitte entstehen durch die Sohleneintiefung, welche ein ständiges Nachrutschen der Böschungen aus Lockermaterial verursacht. Das Nachrutschen erfolgt ein- oder beidseitig. Die beidseitigen Anbrüche werden als Feilenanbrüche bezeichnet (Abb. 8).

B) Sohle in latenter Erosion

Die Sohle befindet sich im Zustand latenter Erosion, wenn der Eintiefungsprozess sehr langsam erfolgt. Die Sohle besteht entweder aus anstehendem Fels oder ist mit grobblockigem Material abgepflästert. Die Tiefenerosion ist in der Regel nicht direkt sichtbar.

- *Sohle aus Fels*
Die Erosionsleistung hängt sehr stark von der Beschaffenheit des Gesteins ab. Bäche, die sich in harten Fels eingetieft haben, verlaufen heute in engen Schluchten (Abb. 9).
- *Grobblockig abgepflästerte Sohle*
Eine grobblockig abgepflästerte Sohle kann ähnlich erosionshemmend wirken wie anstehender Fels. Der Eintrag von grobblockigem Material aus Hangprozessen kann die Wirkung der Sohlenabpflasterung unterstützen.

C) Sohle in Beharrung

Halten sich in einem Gerinneabschnitt Eintiefung und Auflandung die Waage, befindet sich die Sohle 'in Beharrung'. Die Feststoffbilanz ist langfristig gesehen ausgeglichen. Umlagerungsstrecken können eine Form der Beharrung sein, auch wenn sich bisweilen stärkere Laufänderungen und



Abb. 8 Eintiefungsstrecke (mit Feilenanbruch) im Ri di Prugiasco, Val Blenio, Tessin

stellenweise Eintiefungen oder Auflandungen ergeben. Gerade in voralpinen Bächen und Flüssen finden sich in Umlagerungsstrecken oft ausgedehnte Kiesbänke, welche durch das nächste Hochwasser wieder erodiert werden. Erosions- und Akkumulationstendenzen gleichen sich im zeitlichen wie räumlichen Wechsel aus.

D) Sohle in Auflandung

Sobald das Transportvermögen des Fließgewässers nicht mehr ausreicht, das anfallende Feststoffmaterial weiter zu bewegen, kommt es zur Ablagerung. Auflandungs- oder Akkumulationsstrecken finden sich meist in den unteren Bachbereichen mit geringem Gefälle. Häufig finden sich solche Auflandungsstrecken ausgangs einer Schluchtstrecke, wo sich Gefälle, Bachbreite sowie die Sohlen- und Böschungsrauigkeit verändern.

Es können drei Formen der Auflandung unterschieden werden:

- 1) Kegel
- 2) Dammflüsse
- 3) Auflandung hinter einer Erosionsbasis.

Kegel

Abgelagertes Material baut einen Kegel auf. Art und Weise der Entstehung eines Kegels hängt mit dem langfristigen Abflussregime und dem Feststoffhaushalt des betreffenden Einzugsgebietes zusammen. Das Kegelwachstum findet v. a. bei grösseren Ereignissen statt, wenn die Feststoffe das Bachbett verlassen und abgelagert werden. Dabei wird normalerweise nur ein bestimmter Sektor der Kegeloberfläche überführt. Das Feinmaterial wird im Gerinne teilweise über den Kegel hinaus dem Vorfluter zugeschwemmt. Beispiele von regelmässigen Kegeln finden sich bei vielen Bächen im Obergoms, beispielsweise beim Milibach (Abb.10).

Ändert sich das Abflussregime oder der Feststoffhaushalt im Einzugsgebiet, kann die Bildung des Schwemmkegels verzögert oder gänzlich gestoppt werden. Der Bach beginnt sich wiederum einzutiefen und reaktiviert so das lange Zeit liegen gebliebene Material. Relikte Kegel kommen häufig vor, so beispielsweise in den Bächen *Sinzera* im Vorderrheintal, *Biderbach* im Saas Tal, *Ri di Cavanna* und *Ri di Ronco* im Bedrettal oder auch *Prugiasco* im Bleniotal. Manchmal bilden sich unterhalb von relikten Kegeln wieder neue Kegel, zum Beispiel im Falle der *Sinzera* (Abb. 11).

Eine andere Form von Verzögerung oder gänzlichen Ausschaltung der Kegelbildung ergibt sich durch wasserbauliche Massnahmen. Dabei sind vor allem zwei Arten von Massnahmen wichtig:

- *Bau von Kanälen*

Der Bau eines Kanals soll in erster Linie die Schleppkraft resp. die Transportkapazität des Gerinnes auf dem Kegel erhöhen, damit die Feststoffe schadlos abgeführt werden. Ist das Querprofil des Kanals genügend, werden die Feststoffe direkt dem Vorfluter zugeführt. Die Ablagerung von Feststoffen auf dem Kegel erfolgt nur noch selten, bei Extremereignissen.

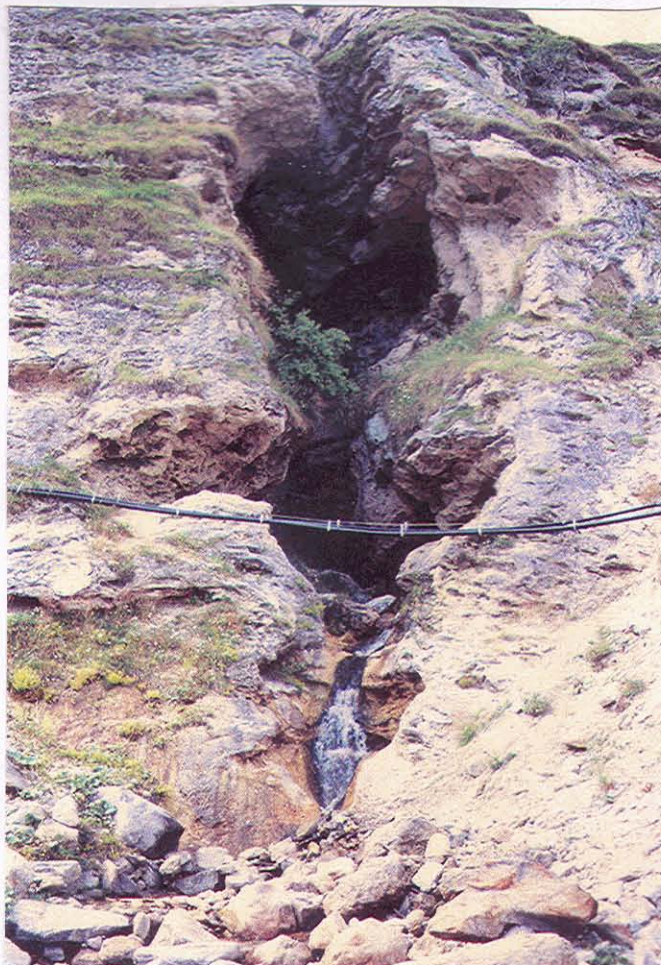


Abb. 9 Tiefenerosion im Fels im Ri Prugiasco, Val Blenio, Tessin



Abb. 10 Kegel des Milibachs im Obergoms

- *Bau von Geschiebeablagerungsplätzen*

Mit dem Bau eines Geschiebeablagerungsplatzes soll der Feststoffeintrag in eine bestimmte Bachstrecke, auf den Kegel oder in den Vorfluter, verhindert werden. Der Geschiebeablagerungsplatz muss je nach Konstruktionsart geleert und das Geschiebe an geeigneter Stelle deponiert werden. Ein Beispiel findet sich auf dem Kegel der Sinzera (Abb. 11).

Diese auch 'Aufsattelung' genannte Erhöhung des Bachbettes auf dem eigenen Lockermaterial entsteht dadurch, dass der Bach durch starke Feststoffbelastung einen Damm vor sich her baut und auf dessen Krone verläuft. Das Material wird so immer an einer anderen Stelle abgelagert, so dass keine eigentlichen Schuttkegel entstehen. Ein Beispiel eines Dammflusses ist der Rütigraben bei Kröschenbrunnen im Emmental.

Auflandung hinter einer Erosionsbasis

Oft sammelt sich im Laufe der Zeit hinter einer grösseren Erosionsbasis Material an, z. B. hinter einem Felsriegel. Auch Karschwellen unterbinden oft die Feststoffzufuhr in untere Gerinnebereiche. Die Auflandung dauert dabei so lange, bis die Karschwelle ähnlich einer Retentionssperre hinterfüllt ist.

E) Flachstrecken

Flache Gerinneabschnitte können langfristig Auflandungstendenzen aufweisen. Ist dies im Sinne eines Geschiebeablagerungsplatzes erwünscht, kann die Ablagerung durch Retentionssperren gefördert werden.



Abb. 11 Kegel des Sinzerabachs im Vorderrheintal

1.6.2 Verlagerungsprozesse

A) Geschiebetransport

A1) Der Vorgang des Geschiebetransports

Der Geschiebetransport im Wildbach wird durch die vielschichtigen Strömungsverhältnisse beeinflusst. Wesentliche Zusammenhänge zwischen Abfluss und Feststofftransport sind aber noch ungeklärt.

Das mobilisierbare Geschiebe ist nur bedingt von der Wasserfracht abhängig. Neben der Bedeutung des Verlagerungsprozesses ist dafür auch die Vorgeschichte bezüglich Geschiebeaufbereitung und -lieferung von Bedeutung.

Der Vorgang des Geschiebetransports charakterisiert sich durch verschiedene Eigenschaften, welche die Erfassung und Modellierung erschweren:

- Der Geschiebetransport setzt erst bei einer bestimmten Grenzscheppspannung bzw. einer bestimmten Grenzgeschwindigkeit ein. Die Grundlagen zur Berechnung der kritischen Werte haben bereits Hjulström (1935) und Shields (1936) erarbeitet. So kann der Grenzabfluss, oberhalb welchem der Schwebstoff- oder Geschiebetransport beginnt, nach verschiedenen Verfahren für gerade Gerinne bestimmt werden. In Wildbächen mit turbulenter Wasserführung variiert der Grenzabfluss innerhalb kleinster Abschnitte, so dass der Transportbeginn nicht einheitlich definiert werden kann. Der Beginn der Sedimentbewegung ergibt sich vielmehr aus stochastischen Größen. Solche sind z. B. die momentan herrschende Turbulenz sowie Lage und Exposition der Körner.

- Die Ganglinie des Geschiebetransports bildet kein Kontinuum. Der Geschiebetransport ist nicht stationär, sondern erfolgt in Schüben. Die Ganglinie des Geschiebetransports steht nicht in einem linearen oder sonst leicht fassbaren Zusammenhang mit der Abflussganglinie.
- Der Geschiebetransport wird wesentlich von der Unbeständigkeit des Strömungsbildes und nur indirekt von der Wassermenge und der Geschwindigkeit an der Sohle gesteuert.
- Der Geschiebetransport kann nicht nur durch hydraulische Faktoren erklärt werden. Neben den hydrodynamischen Verhältnissen ist auch entscheidend, ob genügend Material vorhanden ist.
- Der Gerinnequerschnitt und das Längsprofil können sich bei Geschiebetransport, z.B. durch Anhebung oder Eintiefung der Sohle, laufend verändern. Die wirklichen Abmessungen des Gerinnequerschnitts sind also meist unbekannt. Zudem ist die transportierte Geschiebemenge nicht gleichmässig über den Abflussquerschnitt verteilt.
- Die Korngrößenverteilung ist - über den Abflussquerschnitt betrachtet - nicht homogen.

Die bekannten Geschiebefunktionen vermögen deshalb den natürlichen Sachverhalt nur unzureichend darzustellen. Empirische Modelle orientieren sich an den physikalischen Gesetzmässigkeiten. Sie basieren ausserdem auf Analysen von konkreten Fällen im Gelände oder auf Modellversuchen. Dabei werden, wie bei jeder Modellierung, bestimmte Aspekte der Prozesse besonders berücksichtigt, andere werden bewusst vernachlässigt. In der Praxis ist es schwierig, die erforderlichen Ausgangsdaten zu erheben.

Die im Wasser transportierten Feststoffe bewegen sich entweder auf der Sohle rollend, gleitend oder springend als Geschiebe oder im gesamten Abflussprofil verteilt (schwebend) als Schwebstoffe. Das Geschiebe steht während seines Transports in einer dauernden Interaktion mit der Sohle, die Schwebstofffraktion dagegen nicht. Das Transportverhalten von Schwebstoff und dem eigentlichen Geschiebe kann nicht gleichgesetzt werden. Der Transport von Feinmaterial setzt oft unmittelbar nach einer Erhöhung des Abflusses ein. Die Mobilisation von Geschiebe hingegen geht oft langsam vor sich. Die Spitze des Geschiebedurchgangs tritt dadurch häufig spät, nach dem Scheitelabfluss, auf. Der Korndurchmesser für die Grenze Geschiebe/Schwebstoff verschiebt sich je nach örtlichem und momentanem Strömungsbild. Es ist daher in der Praxis nicht immer möglich, eine Grenze zwischen Feinmaterial und Geschiebe zu bezeichnen.

A2) Geschiebetransportformeln

Mit den Geschiebetransportformeln lässt sich die *Geschiebetransportkapazität*, d. h. die bei gegebenen Bedingungen im Gerinne pro Zeiteinheit transportierbare Feststoffmenge, berechnen. Die in der Natur tatsächlich erreichten Werte sind jedoch meistens tiefer. So kann beispielsweise die Rauigkeit, d. h. vor allem Hindernisse, in den Transportformeln zu wenig stark gewichtet werden.

Zur Anwendung von Geschiebetransportformeln auf natürliche Verhältnisse sind daher einige Vorbehalte anzubringen. Die meisten Formeln basieren auf Untersuchungen im Labor, wo die natürlichen Verhältnisse idealisiert werden:

- Die im Labor genau bekannte Korngrößenverteilung im Sohlenmaterial ist in natürlichen Gerinnen nicht bekannt. Die tatsächlich vorhandene Korngrössenzusammensetzung kann nur punktwise erfasst und mittels Extrapolation bestimmt werden. Überdies ist das Korngrössenspektrum gerade in Wildbächen sehr variabel, wobei die Unterschiede zwischen dem Grösstkorn und den kleineren massgebenden Korngrössenklassen generell sehr gross sind.
- Klar definierte Ausgangsgrößen bezüglich der Gerinnegeometrie sind in der Natur höchstens in neuen kanalisierten Gerinneabschnitten anzutreffen. In unverbauten Gerinnen müssen die für die Berechnung des Geschiebetransports benötigten Gerinneparameter (Breite, Gefälle) anhand weniger repräsentativer Querschnitte ermittelt werden.

B) Murgänge

In Gebirgsräumen zählen Murgänge zu denjenigen gefährlichen Prozessen, welche die grössten Schäden verursachen. Ihr zeitlich wie örtlich unberechenbares Auftreten erschwert das Studium grundlegender Verhaltensweisen. Feldbeobachtungen von Murgängen sind nur selten möglich. Auch

sind die Bewegungs- und Transportmechanismen von Murgängen nur teilweise geklärt. Die aufwendigsten und kompliziertesten physikalischen Modelle vermögen jeweils nur Teilbereiche des Prozesses zu erfassen. Abschätzungen von Murenfrachten sind deshalb noch viel ungenauer als beim Geschiebetransport.

Dies ist eine entscheidende Schwachstelle, welche die Unsicherheit der Aussagen beträchtlich erhöht. Murgänge sind nämlich in einem Grossteil der Wildbäche in den Alpen ein weitverbreitetes Phänomen.

Eine Zusammenfassung für die Beurteilung von Murgängen findet sich auch bei Rickenmann (1995).

B1) Definition

Ein Murgang wird hier folgendermassen definiert:

Ein Murgang ist eine durch einen Ausbruch aus wassergesättigtem Lockermaterial im Hang, Sohlenverflüssigung, oder einen Dammbruch entstandene Mischung aus Wasser und Feststoffen, welche sich unter Bildung einer deutlichen Front und seitlicher Dämme (Levéés) unter zeitweiliger hoher Erosionsleistung unterschiedlich schnell, schubartig und wellenförmig verlagert, und welche infolge plötzlicher Veränderung der Feststoffkonzentration ohne Materialentmischung 'en masse' zum Stillstand kommt.

B2) Merkmale für die Erkennung von Murgängen

Jeder Murgang hat bezüglich Auftreten (Zeit und Raum) und Materialzusammensetzung immer wieder besondere Eigenschaften, was die Ableitung allgemeingültiger Regeln natürlich sehr erschwert.

Die folgenden Merkmale sind typisch:

- Während des Bewegungsvorganges bilden sich oft die charakteristischen seitlichen Levées. In den Levées erfolgt keine Materialsortierung.
- Wo keine Levéebildung möglich ist, bleiben häufig grössere, kantengerundete Gesteinsbrocken beidseitig des Gerinnes liegen.
- Wo dies im Lockermaterial möglich ist, entstehen U-förmige Erosionsquerschnitte.
- Eine eigentliche Entmischung von Grobkomponenten und Feinmaterial findet bei der Ablagerung des Materials nicht statt. Der Murgang kommt "en masse" zum Stillstand.
- Ablagerungen sind oft zungenförmig.

B3) Klassifikation von Murgängen und murgangartigen Abflüssen

Murgänge können nach verschiedenen Kriterien unterschieden werden.

a) Entstehung und Anrisszonen

Für die Entstehung von Murgängen ist zwischen Bedingungen zu unterscheiden, welche Murgänge grundsätzlich ermöglichen (Disposition), und solchen, welche sie letztlich auslösen. Grundsätzliche Bedingungen sind beispielsweise ein bestimmtes Minimalgefälle (siehe unten) oder eine bestimmte Zusammensetzung des Ausgangsmaterials.

Die Auslösung von Murgängen erfolgt zum grossen Teil durch Niederschläge. Die dafür notwendige Niederschlagsmenge hängt von lokalen Begebenheiten und den hydrologischen Bedingungen vor dem Ereignis ab (z. B. Füllungsgrad der Bodenspeicher). Im Moment ist es aber nicht möglich, bestimmte kritische Niederschlagswerte für die Auslösung von Murgängen zu bezeichnen.

Murgänge können im Hangbereich und im Gerinne entstehen. Im Gerinne bilden sich Murgänge entweder durch Verflüssigung des Sohlenmaterials oder infolge eines Dammbruchs.

VAW (1992) und Haeberli et al. (1991) unterscheiden nach der Art ihrer Entstehung verschiedene Anrisszonen (vgl. Fig. 5). Dabei spielt ein bestimmtes Minimalgefälle eine Rolle (Tab. 3).

b) Dichte des Gemisches und Fliessverhalten

Die Dichte des Feststoff-Wassergemisches beeinflusst auch dessen Fliessverhalten. Es können hier zwei Extremfälle dargestellt werden:

- Einerseits turbulente Abflüsse mit einem Feststoff-Wassergemisch von relativ geringer Dichte bis ungefähr 1.5 t/m^3

Das Fliessverhalten ist mit demjenigen eines geschiebeführenden Hochwassers zu vergleichen, mit dem Unterschied, dass es sich hier um eine breiartige Flüssigkeit handelt. Das Geschiebe wird ähnlich wie bei gewöhnlichem Geschiebetransport der Sohle entlang befördert.

- Andererseits ein Gemisch mit relativ hoher Dichte von über 1.8 t/m^3

Die Fortbewegung der einzelnen Komponenten erfolgt durch stark "pulsierendes" Fliessen. Innerhalb der einzelnen Wellen scheint die Strömung laminar, die Viskosität ist jedoch höher als bei den eben erwähnten turbulenten Abflussmischungen mit relativ geringer Dichte. Grobkörniges Material verteilt sich über die gesamte Strömung.

Tab. 3 Auslösung von Murgängen

Klasse	Beschreibung	Gefällsbereich
Typ 1	Anrisse im steilen Schutthang, welcher oft aus glazialen Ablagerungen mit nur schwach ausgeprägten Gerinnen besteht	27 - 38°
Typ 2	Anrisse im Bereich der Kontaktzone Felswand/Schutthalde	27 - 38°
Typ 3	Entstehung im schuttgefüllten steilen Gerinne, welches in vielen Fällen in höheren Lagen mit Gletschern bedeckt gewesen ist	45 - 70% (24-35°)
Typ 4	Mobilisation grösserer Zwischendeponien im Gerinne von Wildbächen	23 - 65% (13-33°)

In den meisten Fällen bleibt das Grenzgefälle im Gerinne über 25% (für Typen 3 und 4).

c) Materialzusammensetzung (Wasser, Fein- und Grobmaterial)

Nach Takahashi (1989) können folgende Unterschiede gemacht werden:

- Murgänge mit hohem Anteil an Grobkomponenten ("Stony debris flow") mit wenig Wasser- und Feinmaterial
- Murgänge vornehmlich aus Feinmaterial ("Muddy debris flow" oder "turbulent mudflow")
- Mischung aus "stony debris flow" im sohlennahen Bereich und "turbulent mudflow" in den oberflächennahen Bereichen.
- "Unreife" Murgänge, in welchen sich die einzelnen Partikel wie bei intensivem Geschiebetransport bewegen, wobei die oberen fliessenden Schichten vor allem aus Schlamm und nur aus wenigen Körnern bestehen.

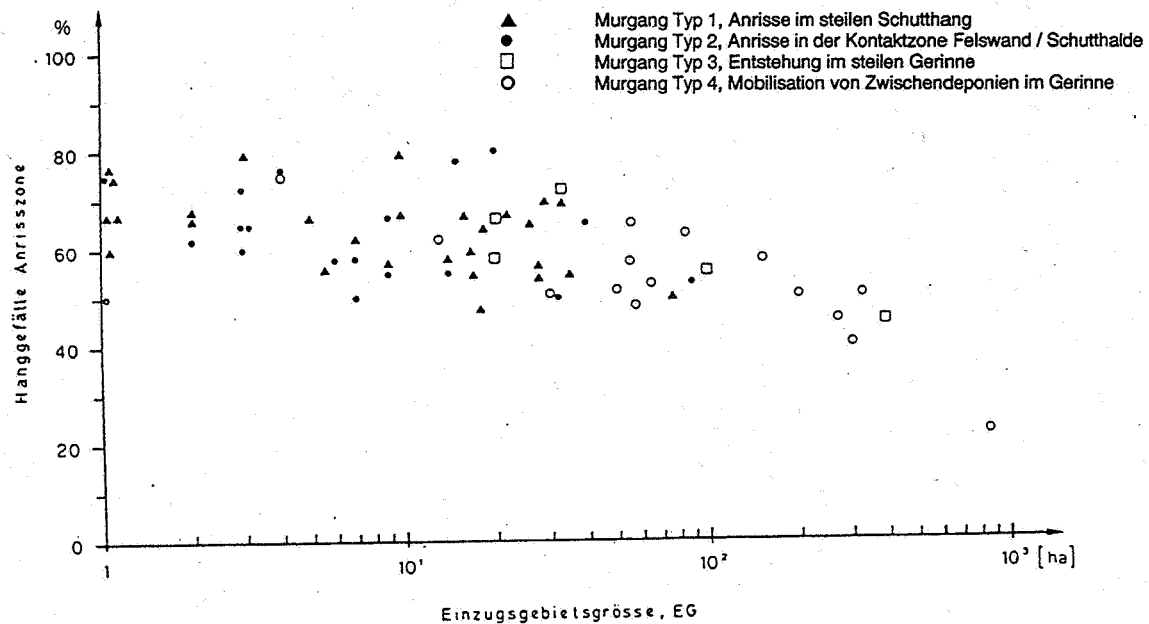


Fig. 5 Einzugsgebiet und Hanggefälle in den Anrisszonen (VAW 1992). Die Legende bezeichnet die Murgang-Typen 1 bis 4, wie sie im Text beschrieben sind.

C) Abschätzung einzelner Parameter

Für die Praxis sind die folgenden Parameter wichtig:

- Fließgeschwindigkeit
- Erosionstiefen
- Maximalabflüsse (für die Dimensionierung von Bauwerken)
- Murenfracht
- Ablagerungsvorgänge (Erstellung von Bauwerken, Gefahrenzonierung)
- Auslaufdistancen (Gefahrenzonierung)
- Abschätzung der Auftretensfrequenz.

Die in der Folge aufgeführten Schätzmethode liefern höchstens grobe Näherungswerte. Sie sind, für sich alleine genommen, für den praktischen Einsatz nicht geeignet. Auch hier spielt die Felderfahrung eine grosse Rolle, mittels welcher die Plausibilität der errechneten Werte beurteilt und im Gelände überprüft werden kann.

C1) Abschätzung der Fließgeschwindigkeit

Die Fließgeschwindigkeit eines Murganges wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst:

- Auslösebedingungen
- Dichte und Materialzusammensetzung
- Sättigungsgrad des Gemisches (Aufnahmefähigkeit für zusätzliches Material, Erosionsleistung)
- Ausprägung des Gerinnes (Breite, Gefälle, 'Rauigkeit')
- Hindernisse.

Die Fließgeschwindigkeiten sind, gegeben durch diese Faktoren, sehr unterschiedlich. Für Anwendung der nachstehenden Gleichungen müssen entsprechende Spuren im Gelände vorhanden sein (vgl. Fig. 6).

Berechnung anhand der Kurvenüberhöhung

$$v = k_c (g \tan \beta R_c \cos \theta)^{\frac{1}{2}} \quad [\text{m/s}]$$

wobei k_c = Korrekturfaktor (0.63), g = Erdbeschleunigung [$9,81 \text{ m/s}^2$], β = Neigung der Kurvenüberhöhung [$^\circ$], R_c = Kurvenradius [m], θ = Gerinneneigung [$^\circ$].

Die folgende Gleichung wird auch verwendet:

$$v = (g \tan \beta R_a)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R_a - b}{R_a} \right) \quad [\text{m/s}]$$

wobei R_a = Radius der Kurvenaussenseite [m], b = Breite der Murgangspuren [m] (Haiden 1925, in Aulitzky 1989).

Berechnung anhand der Höhe des Aufstaus an einem Hindernis

$$v = \sqrt{\Delta H \cdot 2g} \quad [\text{m/s}]$$

wobei ΔH = die Auflaufhöhe [m] auf ein Hindernis ist (nach Costa 1984, zit. in VAW 1992).

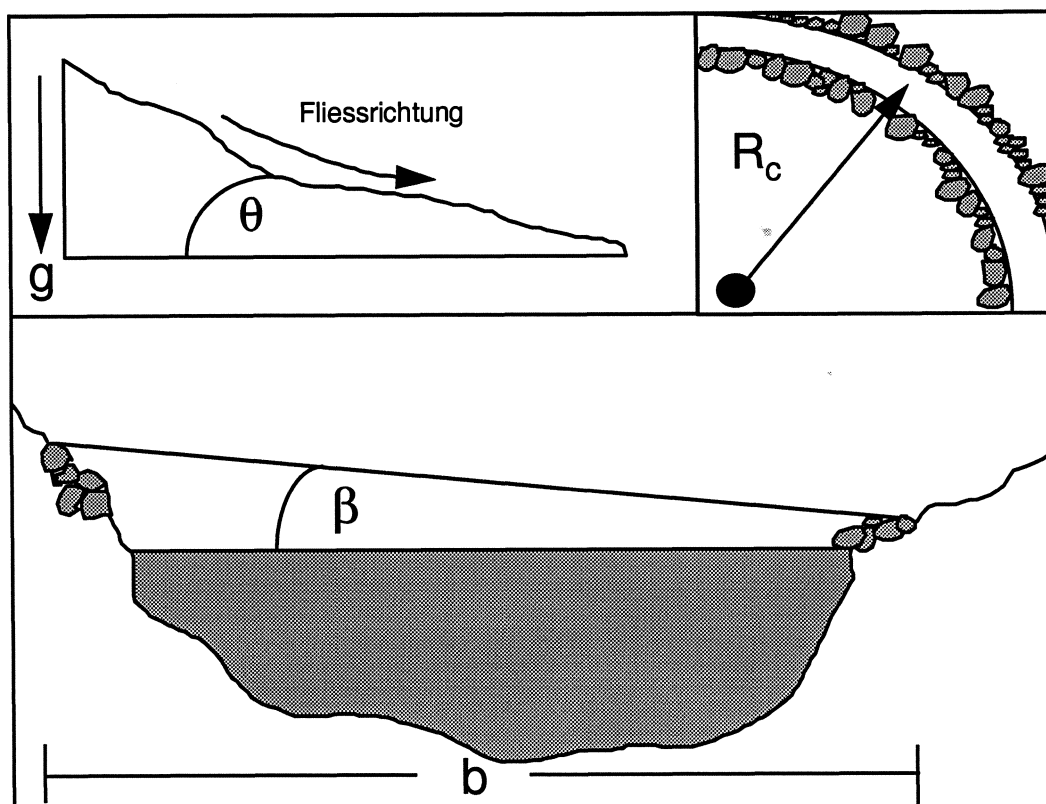


Fig. 6 Schematische Darstellung zur Berechnung der Fließgeschwindigkeit von Murgängen anhand der Kurvenüberhöhung

C2) Abschätzung der Erosionstiefen

Die Tiefenerosion durch Murgänge hängt stark von deren Masse, dem Fliessverhalten und den örtlichen Gerinnebedingungen ab. Japanische Richtlinien (Public Works Research Institute 1988, zitiert in VAW 1992), gehen von einer maximalen Erosionstiefe von 6 m aus. Gemäss VAW (1992) und Häberli et al. (1991) können aber auch höhere Erosionstiefen vorkommen, wie sie beispielsweise während der Ereignissen von 1987 in den Bächen Plaunca und Varuna (Kanton Graubünden) und im Gerental (Kanton Wallis) beobachtet worden sind.

Für Schwemmkegel können die maximalen Tiefen von Erosionsrinnen in Abhängigkeit des Schwemmkegelgefälles mit

$$\begin{aligned} t &= 1.5 + 0.125 * J & [\%] \\ \text{bzw.} \\ t &= 1.3 + 0.667 * \ln J & [\%] \end{aligned}$$

grob angenähert werden (Kronfellner-Kraus 1984). Dabei bedeutet J das Schwemmkegelgefälle in [%].

Mit zunehmendem Gefälle nimmt auch die Erosionskraft tendenziell zu. Bei ganz steilen Gefällen nimmt sie hingegen wieder ab, weil die Komponente der Schwerkraft fast parallel zur Hangoberfläche wirkt. Bei der Abschätzung der Erosionstiefe kann auch die Gerinne- oder Rensenbreite als Hilfe dienen. Im Mittel wurde bei den Ereignissen von 1987 das Verhältnis Tiefe zu Breite von 1 : 5 nicht überschritten (in Extremfällen sind allerdings Ausnahmen bis zu einem Verhältnis 1 : 3 möglich).

C3) Abschätzung des Maximalabflusses

Die Berechnung von Murgangabflüssen ist mittels Spuren im Gelände möglich. Ein Ansatz findet sich beispielsweise bei Johnson und Rodine (1984) oder van Stejin et al. (1988):

$$Q_{\max} = v * \Pi * \left(\frac{WD}{4} \right) \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$Q_{\max}$ = Maximalabfluss [m^3/s], v = mittlere Fliessgeschwindigkeit [m/s], $\Pi = 3.14$, W = Abflussbreite [m], D = Abflusstiefe [m]

Mizuyama et al. (1992) berechnen den Maximalabfluss folgendermassen:

$$Q_{\max} = 0.135 M^{0.78} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

M = Murenfracht [m^3]

Murgänge können Gesamtabflussmengen erreichen, welche um vieles höher als entsprechende Reinwasserabflüsse sind.

C4) Abschätzung der Murenfracht

Für die Berechnung der Murenfracht gibt es keine zuverlässigen Methoden. Die bestehenden Faustformeln umfassen Parameter wie Wasserangebot, Einzugsgebietsfläche, Schwemm- resp. Murkegelgefälle oder Verlandungsgefälle auf dem Kegel, Pauschalgefälle (Durchschnittsgefälle vom obersten Anrisspunkt des Murganges bis zum äussersten Ablagerungspunkt auf dem Kegel), mittleres Bachgefälle oder Bachlänge. Vor allem die Dauer des Vorganges hat einen grossen Einfluss auf die Fracht. Obschon viele Augenzeugen Murgangswellen beobachtet haben - z. B. während der Ereignisse von 1987 - bestehen sehr unterschiedliche Angaben über die Dauer von Murgängen. Sie dürfte u. a. von den spezifischen Eigenheiten des Einzugsgebietes, des betreffenden Ereignisses als auch von Entstehung, Materialzusammensetzung und Fliessverhalten des Murganges abhängen. Die Dauer eines Murganges kann sich von Sekunden bis über mehrere Minuten hinziehen. Aus der Literatur ist eine Zeitdauer von bis zu drei Tagen bekannt (Pierson 1980).

Ein Ansatz zur quantitativen Bestimmung der Verlagerungskapazität von Murgängen ist in der Geschiebetransportformel von Rickenmann (1990) zu finden, welcher nicht Reinwasser, sondern eine schlammartige Flüssigkeit als Transportmedium zugrunde liegt.

Für schweizerische Verhältnisse leitet Rickenmann (1995) in Funktion des Kegelgefälles zwei Berechnungsverfahren ab:

$$M = (6.4J_k - 23)L \quad \text{für } 5\% < J_k < 15\% \quad [m^3]$$

$$M = (110 - 2.5J_k)L \quad \text{für } 15\% < J_k < 40\% \quad [m^3]$$

M = Murenfracht [m^3], J_k = Kegelgefälle in %, L = erodierbare Gerinnelänge [m].

Die Formeln weisen gegenüber allen andern gängigen Berechnungsmethoden den Vorteil auf, dass sie anstatt der Einzugsgebietsfläche die Gerinnelänge, entlang welcher der Murgang einen Grossteil des Materials aufnimmt, berücksichtigen.

Für österreichische Verhältnisse stellte Hampel (1980) die folgende Beziehung auf:

$$M = \frac{4.47E * h_{100} * \Psi_0 \left(\frac{1-H_u}{2300} \right) (J - 1.23)^{2.63}}{J * S^I} \quad [m^3]$$

E = Einzugsgebiet, h_{100} = 100jähriger 24-h-Regen [mm], Ψ_0 = Abflussreduktion durch Versickerung [-], H_u = Meereshöhe des Talbodens im Bereich der Mündung [m ü. M.], J = Schwemmkegelgefälle [%], S = Abriebsfaktor [-], z. B. 0.66 für die Zentralalpen, I = Lauflänge des Geschiebes [m]

Kronfellner-Kraus (1982, 1984, 1987) verwendet die folgende Beziehung zur Bestimmung der maximalen Feststofffracht am Kegel:

$$GS = K E J \quad [m^3]$$

GS = Feststofffracht [m^3], d. h. **G**eschiebe und **S**chwebstoff, E = Einzugsgebietsgrösse, [km^2], J = Erosions- und Transportgefälle [%]

Für die K-Werte werden folgende Werte angegeben:

- Für die Wildbachzone I, z. B. Wildbäche der Tauern, Stubai, Silvretta, Ötztal, Zillertal etc. mit grossem Geschiebepotential

$$K = \frac{1750}{e^{0.018E}} \quad [-]$$

- Für die Wildbachzone II, d. h. übrige Wildbäche des Tauernhauptkammes sowie Wildbäche der nördl. und südl. Kalkalpen mit grossem Potential:

$$K = \frac{1150}{e^{0.014E}} \quad [-]$$

- übrige Wildbachzone II:

$$K = \frac{540}{e^{0.008E}} \quad [-]$$

- III Wildbäche des Alpenvorlandes:

$$K = \frac{254}{e^{0.0016E}} \quad [-]$$

e = 2.72, E = Einzugsgebietsgrösse [km^2]

Wie viele empirisch hergeleitete Verfahren hat auch dieses nur einen regional begrenzten Gültigkeitsbereich. Obschon diese Formel sich an tatsächlich aufgetretenen 'Extremereignissen' orientiert, haftet ihr der Mangel an, dass neben einem Faktor K, welcher die relevanten gebietsspezifischen Einflussparameter in sich vereint, nur die Einzugsgebietsgrösse explizit in das Modell Eingang findet.

C5) Abschätzung der Ablagerungsvorgänge

Die Kenntnisse über die Ablagerung von Murgängen sind vor allem im Hinblick auf eine Gefahrenzonierung wichtig (maximale Ausbreitung). Für die Abschätzung eines realistischen Ablagerungsvorganges müssen neben topographischen Faktoren die folgenden Parameter berücksichtigt werden:

- **Ablagerungsgefälle**
Da Ablagerungen in der Regel dort stattfinden, wo sich das Gefälle deutlich reduziert und sich das Gelände ausweitet, sind diese Ablagerungsstellen immer in Relation zu Gefälle und Breite des nächstoberen Gerinneabschnittes zu betrachten. Ablagerungen können deshalb auch bei sehr hohen Gefällen auftreten. Wie die Erfahrung jedoch zeigt, lagern Murgänge Material bei Gefällen von < 20% mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ab.
- **Ausdehnungen von Murablagerungen**
Murablagerungen dehnen sich auf die etwa 5- bis 6fache Gerinnebreite oberhalb des Kegels aus. Auf dem Kegel selbst kann man von Erfahrungswerten von der 10fachen Gerinnebreite für 5% Kegelgefälle ausgehen.
- **Auslaufdistanz**
Für die Berechnung der Auslaufdistanz gibt es noch kein praxistaugliches Verfahren. Aus diesem Grunde wird empfohlen, die mögliche Auslaufdistanz anhand von Geländeuntersuchungen, unter Einbezug der voraussichtlichen Murenfracht und allfälliger Annahmen über die Fliessgeschwindigkeit, abzuschätzen.

2. Vorarbeiten für die Abschätzung von Feststofffrachten

Vergleiche Teil I, Kapitel 3

2.1 Beschaffung der Unterlagen

Eine umfangreiche Luftbildersammlung befindet sich am Eidg. Institut für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) in Birmensdorf. Die Koordinationsstelle der Vermessungsdirektion für Luftaufnahmen in Dübendorf verwaltet ebenfalls eine grosse Anzahl Luftbilder.

Jedes Jahr wird im Auftrag des Bundesamtes für Landestopographie 1/6 der Fläche der Schweiz turnusgemäss überflogen und photogrammetrisch aufgenommen. Aufgrund dieser Bilder werden die Landeskarten nachgeführt und Raumentwicklungen beobachtet. Im Bereich der Alpen werden diese Flüge seit Beginn der sechziger Jahre durchgeführt. Vereinzelt stehen Luftbilder bereits aus den vierziger Jahren zur Verfügung (z.B. für den Raum Grindelwald).

Das erwähnte Luftbildmaterial wird im Bundesamt für Landestopographie aufbewahrt. Kopien von Luftbildern können für Fr. 5.- (Laserkopie) bzw. Fr. 20.- (Photo) bestellt werden (Preisstand 1995). Für grossräumigere Untersuchungen wird es sich in den wenigsten Fällen lohnen, das Bildmaterial direkt anzuschaffen. Es ist deshalb empfehlenswert, das Material nach vorheriger Anmeldung direkt bei der Landestopographie einzusehen, wo eine stereoskopische Betrachtung gegen Gebühr möglich ist. Dies hat den Vorteil, dass z. B. auch Luftbilder älteren Datums in einem Arbeitsgang interpretiert werden können.

2.1.1 Studium und Interpretation der Unterlagen

Häufig finden sich in den 'Technischen Berichten' von Wildbach-Verbauungsprojekten neben detaillierten Angaben über den Naturraum (z. B. Klima, Geologie, Geomorphologie, Hydrologie) auch Chronologien zu früheren Ereignissen sowie wasserbaulichen und forstlichen Massnahmen im Einzugsgebiet. Sind bei den kantonalen Tiefbauämtern keine diesbezüglichen Informationen vorhanden, empfiehlt sich die Einsichtnahme in die Publikation "Hochwasserschutz in der Schweiz" (1977:178-238), worin sich eine Tabelle aller in der Schweiz zwischen 1854 und 1975 subventionierten Verbauungen findet. Weitere Angaben können beispielsweise im Hydrographischen Jahrbuch der Schweiz und in den Hochwasserbänden der Landeshydrologie und -geologie aufgefunden werden.

Angaben über abgelagerte Kubaturen früherer Ereignisse sind selten und generell mit Vorsicht zu betrachten. Ablagerte Feststoffmengen werden aus verschiedenen Gründen (geringe Dichte der Ablagerungen, Hohlräume, Annahme vereinfachender geometrischer Formen zur Volumenberechnung, ökonomische Interessen beim Wegtransport) oft überschätzt. Richtig eingeschätzt sind sie eine wertvolle Hilfe zur Ermittlung der voraussichtlichen Ereignisfracht und geben oftmals auch Hinweise auf den möglichen Verlagerungsprozess.

Die Abklärung der Murfähigkeit eines Wildbachs anhand von Dokumenten kann Erhebungen im Feld allerdings **nicht** ersetzen. Die Situation im Einzugsgebiet kann sich seit dem letzten Wildbachereignis grundlegend verändert haben, z. B. durch

- Entstehung neuer grösserer Feststoffherde
- Anlage neuer Verbauungswerke
- Massnahmen zur Hangstabilisierung (Entwässerungen, Aufforstungen)
- Zustandsverschlechterungen bestehender Bauwerke (z. B. älterer Holzsperrentreppen).

Hinweise auf die mögliche Verlagerungsart können folgendermassen aussehen:

"...Nach einer Übermurung des Gruonbaches..." (Projekt Gruonbach, Uri 1987)

Der Ausdruck "Übermurung" wird in der Umgangssprache allerdings auch für Geschiebeablagerungen, welche nicht durch einen Murgang verursacht worden sind, verwendet.

"...Eine gewaltige Rufe verschüttete die im Bau befindliche Gotthardbahnlinie..." (Projekt Gruonbach, Uri 1987)

"... soll sich im Jahr ... am Schipfenbach ein Ruffenniedergang von katastrophalem Ausmass ereignet haben." (Projekt Schipfenbach, Uri 1983)

In Zeitungsberichten sind ebenfalls Hinweise zu finden:

"...später rollte eine Lawine aus Felsblöcken, ausgerissenen Bäumen und gewaltigen Geschiebemassen nach ... hinunter ..." (Der Bund, 6. Juli 1987)

"An den Ufern des ... sieht es aus wie in einer hochalpinen Landschaft. Riesige Felsbrocken türmen sich haushoch, teils wurden sie angeschwemmt, teils wurden sie aus dem Bachbett geholt." (Berner Oberländer, 7. Juli 1987)

Die Verbauungsgeschichte eines Wildbaches ist oft eng mit seiner Hochwassergeschichte verknüpft. Verbauungen wurden meistens nach grösseren Hochwassern ausgeführt. Mit wasserbaulichen Massnahmen wird der Charakter des Fliessgewässers oft grundlegend verändert. So werden insbesondere Abflussverhalten und Feststoffhaushalt erheblich beeinflusst, was bei Rekonstruktionen früherer Ereignisse zu berücksichtigen ist. Alter und Zustand der Bauwerke liefern wichtige Hinweise bezüglich möglicher Abfluss- und Feststoffszenarien für künftige Wildbachereignisse. Durch die Zerstörung schlecht unterhaltener oder sehr alter Bauwerke werden zusätzliche Feststoffe mobilisiert, was sich im ungünstigen Fall bis hinunter zum Kegel auswirken kann. Der Bruch einer gesamten Sperrentreppe (Dominoeffekt) kann die Gerinnegeometrie erheblich verändern. Der Einsturz seitlicher Bauwerke kann bei entsprechender Hangaktivität das Gerinne verstopfen und so die Wahrscheinlichkeit eines anschliessendem Durchbruchs erhöhen.

2.1.2 Karten- und Luftbildinterpretation

Bei der Interpretation von Luftbildern ist folgendes zu beachten:

- Probleme (z. B. bedingt durch den unterschiedlichen Abbildungsmassstab) ergeben sich bei der Abschätzung der Bachbreiten und des lokalen Gefälles, soweit letzteres nicht aus der Karte ermittelt wird. Bachbreiten müssen anhand von Vergleichsobjekten (Strasse, Wanderweg, Hausdächer etc.) geschätzt werden, deren Grössen einigermaßen bekannt sind.
- Die Abschätzung von Höhenunterschieden (Vertikaldifferenz) z. B. Höhen von Bachterrassen oder Ablagerungen, ist schwierig. Das Problem kann durch entsprechende Feldabklärungen reduziert werden.

2.2 Massgebende Abflussganglinie

Der massgebende Abfluss kann durch Messungen, hydraulische Berechnungen oder durch ein Schätzverfahren bestimmt werden. Dabei sind sowohl Hochwasserspitzes als auch -ganglinie abzuschätzen.

Hochwasserspitzen in Einzugsgebieten ohne Messstelle werden in der Praxis neben hydrologischen Berechnungen und Übertragung von Hochwasserspitzen mittels Hochwasserformeln ermittelt. Gerade letztere sind in der Praxis umstritten. Ihr Vorteil ist, dass sie mit relativ geringem Aufwand einsetzbar sind.

A) Hochwasserformeln

Koella (1986: 25 ff) unterscheidet und diskutiert vier Kategorien von Hochwasserformeln:

- Formeln mit der Einzugsgebietsfläche als einzigem Gebietsparameter (z. B. Hofbauer 1916)
- Formeln, welche verschiedene Gebietsparameter, jedoch nicht den Niederschlag, berücksichtigen (z. B. Müller 1943)
- Einbezug des Niederschlags neben verschiedenen Gebietsparametern (z. B. Melli 1924)
- Formeln, welche auf statistischen Zusammenhängen basieren (z. B. Sydler et al. 1982).

Die meisten Hochwasserformeln weisen die Form

$$Q = a \cdot E^b \quad [m^3/s]$$

auf, wobei E die Einzugsgebietsfläche, a eine Regressionskonstante und b einen Regressionskoeffizienten darstellt, welcher in den meisten Fällen zwischen 0.5 und 0.8 liegt (Vischer und Naef 1985).

Naef et al. (1986) zeigen am Beispiel von Melli (1924) und Kürsteiner (1917) die Problematik von Hochwasserformeln. Die grössten beobachteten Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten werden durch die beiden Formeln stark unterschätzt. Die Einzugsgebietsgrösse als alleinige unabhängige Variable ist in den wenigsten Fällen genügend. In der Ostschweiz sind zudem zwei- bis zweieinhalbmal so grosse Hochwasser registriert worden wie in vergleichbaren Einzugsgebieten in der Westschweiz (Vischer 1980). Aus diesem Grund ist von einer allgemeinen Anwendung von den empirischen Hochwasserformeln (Kürsteiner, Hofbauer, Melli) abzuraten. Die Verwendung von Formeln, welche auf einer Umhüllenden basieren, ist ebenfalls problembehaftet, werden damit doch die entsprechenden Hochwasser bis um einen Faktor 10 überschätzt (Weingartner und Spreafico 1990).

B) Verfahren nach Koella

Die Hochwasserspitze nach Koella (1986) wird folgendermassen berechnet:

$$HQ_x = (i_x (T1_x + T2_x) + r_s - f_x) \cdot (E_{effx} + E_b) \cdot k_{Gang} \cdot C + Q_{Gle} \quad [m^3/s]$$

Dabei bedeuten:

i_x	=	Intensität des Blockregens	[mm/h]
$T1_x$	=	Benetzungszeit	[h]
$T2_x$	=	Fliesszeit	[h]
r_s	=	Schmelzwasseraequivalent von Schnee	[mm/h]
f_x	=	Verlust	[mm/h]
E_{effx}	=	Beitragende Fläche	[km ²]
E_b	=	befestigte Fläche	[km ²]
k_{Gang}	=	abflusserhöhender Effekt einer Regenganglinie	[-]
c	=	Umrechnungsfaktor mm/h in m ³ /s = 0.278	[-]
Q_{Gle}	=	Gletscherabflussanteil	[m ³ /s]

Mit dem Verfahren von Koella lässt sich ein sog. 20jährliches Hochwasser berechnen. Für ein 100jährliches Hochwasser, welches der vorliegenden Problemstellung besser entspricht, müssen einige Parameter angepasst werden. Der Berechnungsgang für eine 20jährliche Hochwasserspitze ist in Fig. 7, derjenige für die 100jährliche Hochwasserspitze in Fig. 8 dargestellt.

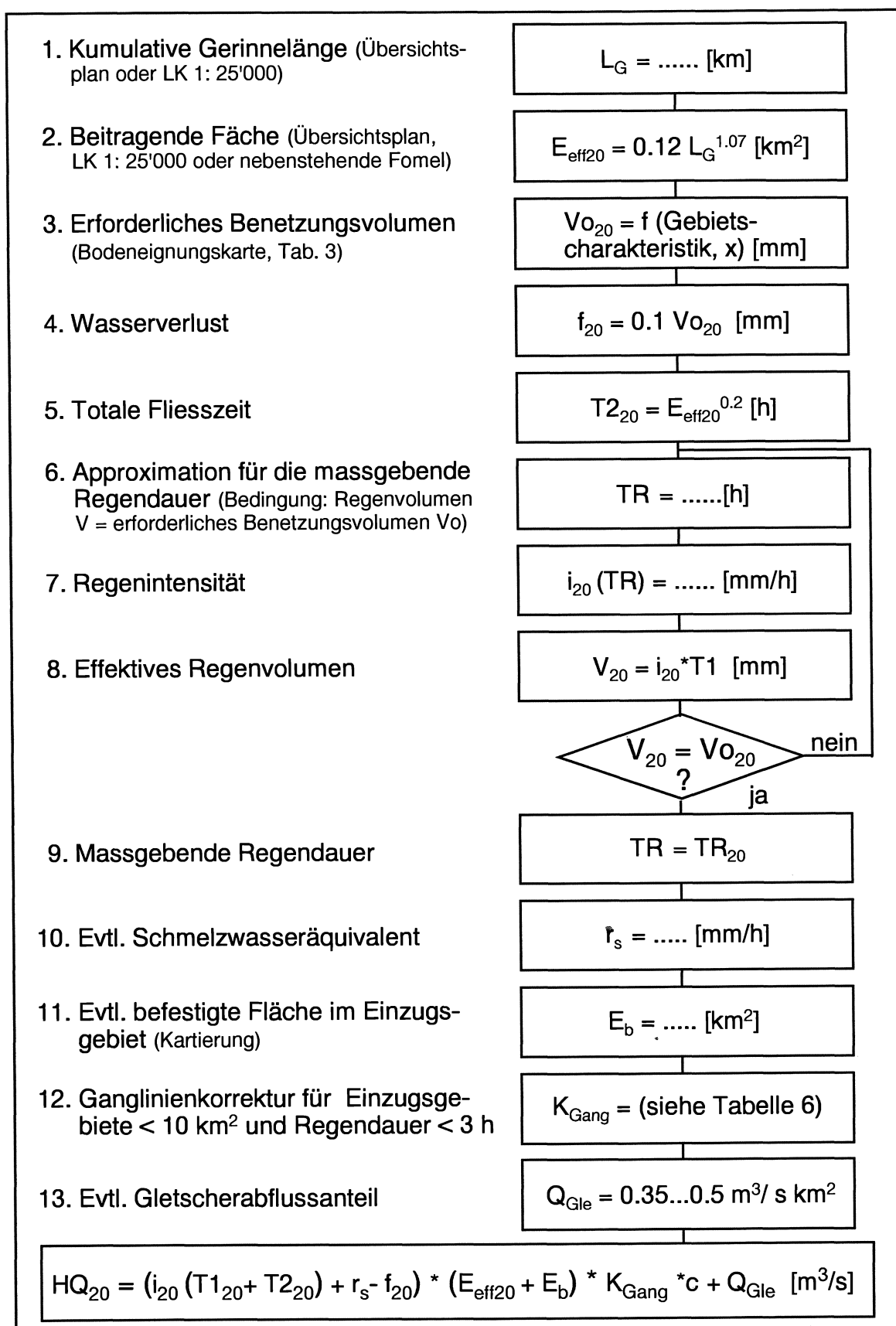


Fig. 7 Flussdiagramm zur Berechnung der 20jährigen Hochwasserspitze nach Koella (verändert nach VAW 1987)

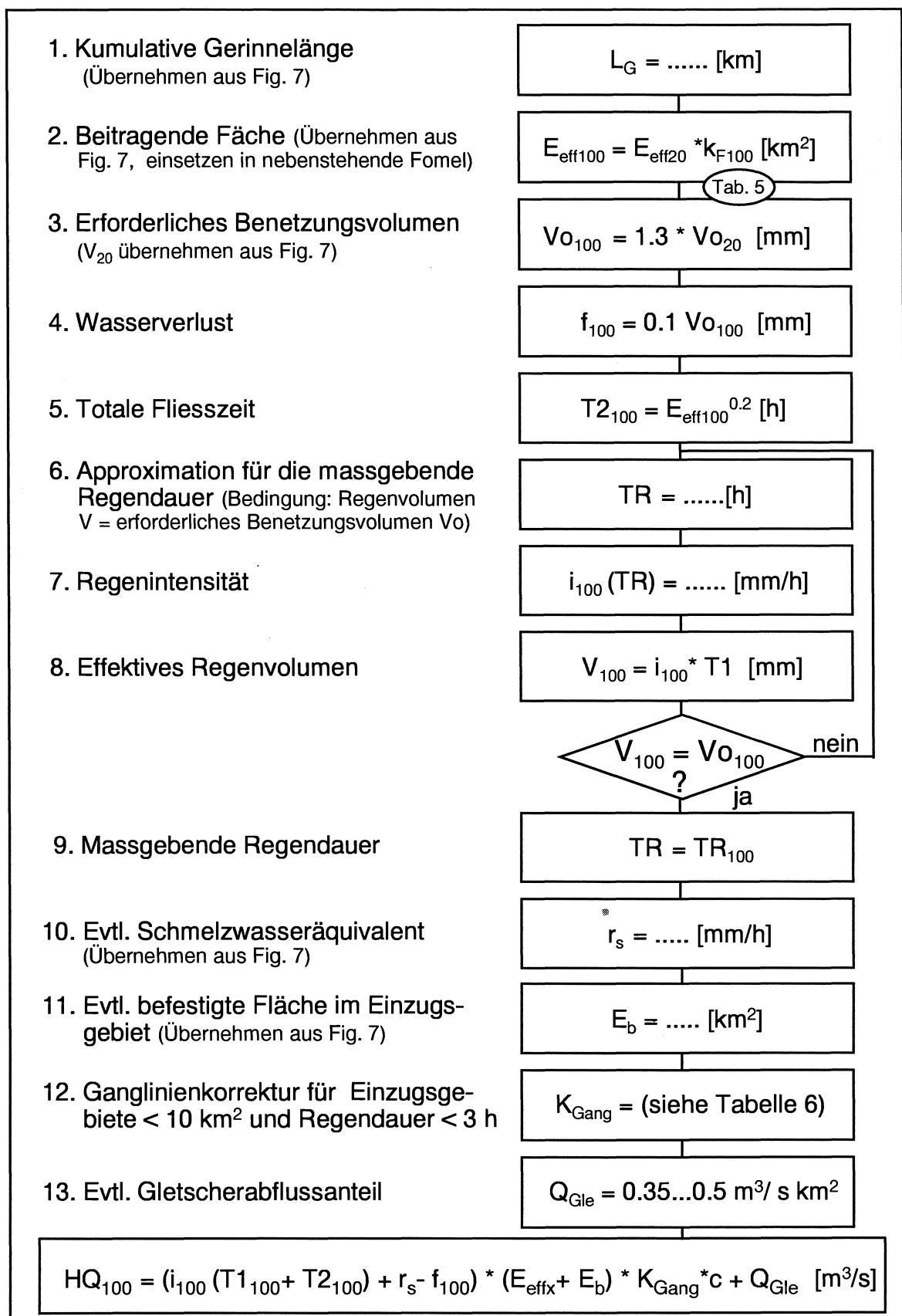


Fig. 8 Flussdiagramm zur Berechnung der 100jährigen Hochwasserspitze nach Koella (verändert nach VAW 1987)

Berechnungsvorgang

1. Messung der Kumulativen Gerinnelänge

Die Kumulative Gerinnelänge umfasst sämtliche oberflächlichen Fließgewässer des Einzugsgebietes und wird mit Hilfe eines Distanzrades auf der Karte 1:25'000 oder besser auf einem Übersichtsplan 1:10'000 (höherer Detaillierungsgrad) ermittelt. Die Kumulative Gerinnelänge ist eine Hilfsgrösse zur Ermittlung der Beitragenden Fläche.

2. Messung oder Berechnung der Beitragenden Fläche

Das Konzept der Beitragenden Fläche (Koella 1986) geht davon aus, dass nur die Flächen, welche hydraulisch am Gerinne angeschlossen sind, zum Abfluss beitragen. Es wird dabei angenommen, dass diese Flächen ihr Wasser zu 100% an das Fließgewässer abgeben.

Die Beitragende Fläche kann aus Landeskarte oder dem Übersichtsplan planimetriert, oder berechnet werden:

$$E_{\text{eff}20} = 0.12 \cdot L_G^{1.07} \quad [\text{km}^2]$$

$$\begin{aligned} E_{\text{eff}200} &= \text{Beitragende Fläche für ein 20jähriges Ereignis} \\ L_G &= \text{Kumulative Gerinnelänge} \end{aligned}$$

Für ein 100jähriges Hochwasserereignis ist die Beitragende Fläche 1.1- bis 1.3mal grösser. Der Korrekturfaktor ist abhängig vom gewählten Bodenkennwert in Tab. 4 und kann aus Tab. 5 herausgelesen werden.

Tab. 4 Landschaftscharakteristika und Bodenarten zur Abschätzung des erforderlichen Regenvolumens (Koella 1986)

Landschaftscharakteristik	Alpine kristalline Berglandschaften		Alpine Kalklandschaften		Flysch-/Bündnerschieferlandschaften		Voralpine Nagelfluhlandschaften		Molasselandschaften		Jura-Kalklandschaften	
	Standard	Trogtäler mit Tal-schotter	Standard	Trogtäler mit Tal-schotter	Standard	Trogtäler mit Tal-schotter	Standard	Sohlen-täler	Standard	Sohlen-täler	Standard	Sohlen-täler
Bodenkarte	V, W	R, Y (V8, W8)	U	R, Y (U8)	S (T)	R, Y, (Q)	M, N, O P, X, (G)	R, Y, (Q)	G, H, K, L	Gl, H4 J1, Q	A, B, C D, E	B2, B5
Basiswert	e	b	c	b	d	b	c	b	d	b	c	b
Tiefgündige Böden	f	c	d	c	d	c	c	c	d	c	d	c
Flachgündige Böden	d	b	b	b	b	b	b	b	d	b	c	b
Starkes Relief	e	b	c	b	c	b	b	b	c	b	b	b
Schwaches Relief	e	b	c	b	d	b	d	b	e	b	c	b
Eeff hauptsächlich in der Nähe des Vorfluters	b	a	b	a	b	a	c	b	d	a	c	a

3. Détermination du volume d'eau d'imbibation

L'épisode pluvieux déterminant engendrant le débit recherché se compose de deux éléments:

- Temps d'imbibation en eau du terrain T1 (= temps de remplissage du sol)
- Temps d'écoulement effectif T2, qui peut être comparé au temps de concentration, bien que cela ne soit pas tout à fait correct au sens strict du terme.

De plus, il faut déterminer la quantité de pluie nécessaire au remplissage des interstices du sol. Pour cela, il faut utiliser la Carte des aptitudes du sol en Suisse (EJPD 1980), qui permet d'attribuer au sol un coefficient. Dans le Tab. 4, un code (A à F) est attribué dans la première colonne à la caractéristique du sol (ligne carte pédologique). La lettre «A» signifie que peu d'interstices du sol doivent être remplis jusqu'à ce que le volume de précipitations participe effectivement à la crue. Au contraire, la lettre «F» signifie que beaucoup d'interstices du sol doivent être remplis.

Les valeurs se trouvent dans les deux premières colonnes du Tab. 5 et sont valables pour un débit d'une période de récurrence de 20 ans. Les facteurs de volume et de surface nécessaires à l'extrapolation, pour un événement d'une période de récurrence de 2.33 et de 100 ans, se trouvent dans les colonnes de droite du Tab. 5.

Tab. 5 Facteurs de volume et de surface pour les extrapolations (Koella 1986)

	Vo20 (mm)	f20 (mm/h)	Vo2.33 (mm)	f2.33 (mm/h)	kF2.33	Vo100 (mm)	f100 (mm/h)	kF100
a	20	$f20 = 0.1 * Vo20$	$Vo2.33 = 0.5 * Vo20$	$f2.33 = 0.1 * Vo2.33$	0.9	$Vo100 = 1.3 * Vo20$	$f100 = 0.1 * Vo100$	1.1
b	25				0.8			1.15
c	30				0.75			1.2
d	35				0.7			1.25
e	40				0.65			1.3
f	45				0.6			1.3

Le débit spécifique d'une crue d'une période de récurrence de 20 ans présente différentes valeurs selon la classification du sol (pour plus d'explications, voir Koella 1986: 73 ss.):

- Pour terrains molassiques du Plateau et terrains calcaires jurassiens: max. 1.5 m³/s km²
- Chaîne bordière alpine avec substrat conglomératique: de 1 à 4 m³/s km²
- Régions de schistes lustrés: < 1.5 m³/s km²
- Régions de flysch: > 2.0 m³/s km²
- Autres types de sol: pas de donnée exacte possible.

Die spezifischen Abflüsse für ein 20jähriges Hochwasser weisen je nach Bodenklasse verschiedene Werte auf (für nähere Erklärungen vgl. Koella 1986: 73 ff):

- für Molasseböden des Mittellandes und Jura-Kalkböden: höchstens 1.5 m³/s km²
- Alpenrandgebiete mit konglomeratischem Untergrund: von 1 bis 4 m³/s km²
- Bündnerschiefergebiete: < 1.5 m³/s km²
- Flyschgebiete: > 2.0 m³/s km²
- andere Bodengruppen: keine genaueren Angaben möglich.

4. Ermittlung des Wasserverlustes

Der Verlust f_x bedeutet eine Verminderung der abflusswirksamen Niederschlagsintensität.

5. Totale Fliesszeit

Die Fliesszeit T_2 errechnet sich sowohl für ein 20- als auch für ein 100jähriges Ereignis mit

$$T_2 = E_{\text{effx}}^{0.2} \quad [\text{h}]$$

6. Massgebender Niederschlag (Regendauer und -intensität)

Nun ist der massgebende Niederschlag (100jähriger Blockregen) zu bestimmen.

Es wird in der Regel von einem sog. Blockregen, d. h. einem Regen mit konstanter Intensität über eine bestimmte Zeit, ausgegangen. Mit zunehmender Dauer des Blockregens nimmt die zugehörige Intensität ab.

Zur Bestimmung des Blockregens ist entweder der Hydrologische Atlas der Schweiz (Geiger et al. 1992) oder Band 7 von "Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes" (Geiger et al. 1991) beizuziehen. Besteht beim betrachteten Einzugsgebiet eine Niederschlagsmessstation, kann aus dem entsprechenden Niederschlags-Intensitäts-Diagramm (Zeller et al. 1976ff.) der Blockregen abgelesen werden. Befindet sich keine Station in der Nähe, so wird die Verwendung des Hydrologischen Atlas empfohlen. Für die Berechnung des Blockregens muss allerdings zuerst ein Niederschlags-Intensitäts-Diagramm erstellt werden.

7. Erstellung des Niederschlags-Intensitäts-Diagramms

Niederschlags-Intensitäts-Diagramme für das fragliche Einzugsgebiet können aus den Starkniederschlagskarten, Kapitel 2.4 im Hydrologischen Atlas der Schweiz (Geiger et al. 1992) oder S. 54 ff. in Geiger et al. (1991) erstellt werden. Hieraus wird der benötigte Blockregen abgeleitet:

- a. Aus der Karte mit Verteilungsfunktion und Extrapolationscode erfolgt die Zuordnung der zum Einzugsgebiet zugehörenden Extremalverteilung.
- b. Bestimmung der Werte für
 - 1stündiger 100jähriger Niederschlag
 - 24stündiger 100jähriger Niederschlag
 - 1stündiger 2.33jähriger Niederschlag
 - 24stündiger 2.33jähriger Niederschlag.

Die Extremalverteilungen für die Herleitung eines Niederschlags-Intensitäts-Diagramms für einen bestimmten Ort lauten:

1. Extremalverteilung:

$$i_{t,T} = C * t^b + 0.248(A * t^a - C * t^b)(y(T) - 0.0577) \quad [\text{mm/h}]$$

2. Extremalverteilung:

$$i_{t,T} = C * t^b * \exp \left[0.248 \left(\ln \frac{A * t^a}{C * t^b} \right) (y(T) - 0.577) \right] \quad [\text{mm/h}]$$

Dabei bedeuten:

A	=	100jähriger 1-Stundenwert (mm) oder (mm/h)
B'	=	100jähriger 24-Stundenwert (mm)
B	=	100jähriger 24-Stunden-Intensitätswert (mm/h); B = B'/24
C	=	2.33jähriger 1-Stundenwert (mm) oder (mm/h)
D'	=	2.33jähriger 24-Stundenwert (mm) oder (mm/h)
D	=	2.33jähriger 24-Stunden-Intensitätswert (mm/h); D = D'/24
t	=	Messintervall (h)
T	=	Wiederkehrperiode (Jahre)
$i_{t,T}$	=	mittlere Intensität eines T-jährlichen Ereignisses mit einem Zeitintervall von t Stunden (mm/h)
$\ln(x)$	=	natürlicher Logarithmus
$\exp(x)$	=	e^x
a	=	$0.315 \ln(B/A)$
b	=	$0.315 \ln(D/C)$
$y(T)$	=	$-\ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)$

Für ein Niederschlagsereignis von zwei Stunden Dauer und einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren beträgt die Niederschlagsintensität für La Neuveville am Bielersee zum Beispiel (1. Extremalverteilung, s. Karte) bei folgenden Werten:

– 100jähriger 1stündiger Niederschlag:	39 mm
– 100jähriger 24stündiger Niederschlag:	105 mm
– 2.33jähriger 1stündiger Niederschlag:	19 mm
– 2.33jähriger 24stündiger Niederschlag:	39 mm
	-----> 22 mm/h
	=====

8. Erforderliches Regenvolumen

Aufgrund der Tabellen 4 und 5 wird das erforderliche Regenvolumen (= Dauer * Intensität) festgelegt. Dieses muss innerhalb der "Füllzeit" T1 gefallen sein. T1 wird mit der Beziehung

$$T_R = T_1 + T_2 \text{ gefunden.}$$

Die Zeitdauer sowie die Regenintensität lassen sich aus dem Niederschlags-Intensitäts-Diagramm herauslesen resp. anhand des erstellten Diagramms berechnen. Durch Iteration muss nun das während der Zeit T1 fallende Regenvolumen dem erforderlichen Regenvolumen gleichgesetzt werden ($V = V_0$).

9. Schmelzwasseräquivalent

In Einzugsgebieten, in denen Hochwasser auch im Winter auftreten, erhöht das Schmelzwasseräquivalent r_s die ermittelte Niederschlagsintensität $i_{x(TR)}$ um höchstens 4 mm/h.

10. Befestigte Fläche

Die befestigte Fläche E_b eines Einzugsgebietes gibt praktisch das gesamte Niederschlagswasser an den Vorfluter ab. Sie erzielt bei Hochwasser damit praktisch dieselbe Wirkung wie die Beitragende Fläche.

11. Ganglinienkorrektur

Da ein Blockregen eine sehr grobe Vereinfachung natürlicher Niederschläge darstellt und Schwankungen der Intensität nicht berücksichtigt, wird in bestimmten Fällen eine Ganglinienkorrektur eingeführt. Die Abflussspitze wird durch das Intensitätsmaximum des Niederschlags beeinflusst. Der höchste Abflusswert tritt ein, wenn das Maximum nicht zu Beginn des Niederschlagsereignisses einsetzt.

Eine Ganglinienkorrektur ist anzuwenden, wenn die massgebende Regendauer weniger als drei Stunden beträgt und die überregnete Fläche kleiner als 10 km² ist (Koella 1986:70/107; Tab. 6).

Tab. 6 Ganglinienkorrektur für die entsprechende Regendauer und Einzugsgebietsfläche (EG)

Regendauer < 1h	$k_{Gang} = 1 + \frac{10 - EG}{9} * 0.2$	(EG > 1 km ²)
	$k_{Gang} = 1.2$	(EG < 1 km ²)
1 h < Regendauer < 3 h	$k_{Gang} = 1 + \frac{3 - TR_x}{2} * \frac{10 - EG}{9} * 0.2$	(EG > 1 km ²)
	$k_{Gang} = 1 + \frac{3 - TR_x}{2} * 0.2$	(EG < 1 km ²)

12. Einfluss der Gletscher

Sind im Einzugsgebiet Gletscher vorhanden, muss deren Schmelzwasserabfluss zum Hochwasserabfluss dazugezählt werden. Für Ereignisse mit Jährlichkeiten von mehr als 20 Jahren und pro 1 km² Gletscherfläche sind etwa 0.4 - 0.5 m³/s zu veranschlagen, für niedrigere Jährlichkeiten 0.35 m³/s. Die Zuschläge sind in der Berechnungsformel zur Abschätzung der Hochwasserspitze berücksichtigt.

Gletscher können einen hochwasserdämpfenden Einfluss ausüben. Dieser Einfluss wird bei zunehmendem Flächenanteil am Einzugsgebiet grösser. Dafür ist der Schmelzabfluss in Rechnung zu stellen, so dass im Prinzip Schmelz- und Regenwasser getrennt behandelt werden müssten. Die errechnete Abflussspitze wäre als eine Superposition der beiden Komponenten zu betrachten (Koella 1986:85). Die Schmelzwasserproduktion pro km² Gletscherfläche kann mit ca. 0.4 - 0.5 m³/s angenommen werden.

Die dämpfende Wirkung der Gletscher wird nun in dem Masse berücksichtigt, als deren Fläche während des Hochwassers als inaktiv betrachtet wird (der Teil des Regens, der auf die Gletscheroberfläche fällt, wird während des betrachteten Ereignisses nicht mehr hochwasserwirksam).

C) Ermittlung der Abflussganglinie

Bei Kenntnis der Konzentrationszeit, der Hochwasserspitze sowie des Anteils Abflussvolumen am Gesamtniederschlag, kann die Abflussganglinie grob bestimmt werden. Die Konzentrationszeit entspricht der Zeit zwischen Beginn des Hochwasseranstiegs bis zum Erreichen der Hochwasserspitze.

Der Abflussbeiwert im Einzugsgebiet kann in Anlehnung an das Verfahren Koella räumlich definiert werden. Er ergibt sich aus dem Quotienten "Beitragende Fläche" über Einzugsgebietsfläche. Der Abflussbeiwert liegt somit irgendwo zwischen 0 (kein Wasser fließt ab) und 1 (alles Niederschlagswasser fließt ab). Dabei wird angenommen, dass sich die Beitragenden Flächen mit zunehmender Niederschlagsdauer hangaufwärts ausdehnen, womit auch der Abflussbeiwert ansteigt. Dieser erreicht theoretisch den Wert 1, wenn die Beitragenden Flächen dieselbe Ausdehnung wie das Einzugsgebiet aufweisen.

D) Laufzeitverfahren

Für kleinere Einzugsgebiete ist die Anwendung des Laufzeitverfahrens unter Umständen sinnvoller. Eine detaillierte Beschreibung findet sich bei Zeller (1981). Die praktische Anwendung, speziell für unverbaute Wildbäche, wird bei Hodel (1993) diskutiert. Für die Anwendung des Laufzeitverfahrens sind gute Gebietskenntnisse notwendig. Es sollten neben dem Gerinnecharakter (Variation von Längen- und Querprofilen, Sohlenbeschaffenheit) besonders auch die Bodeneigenschaften des Einzugsgebietes bekannt sein. Die grössten Probleme dürften einerseits die Ermittlung der Koeffizienten für die Bestimmung der Anlaufzeit des Oberflächenabflusses (siehe Tab. 7), andererseits die Abschätzung der Geschwindigkeit des Gerinneabflusses darstellen. Die Dauer der Abflüsse bestimmt schliesslich die erforderliche Niederschlagsdauer, aufgrund welcher das HQ errechnet werden soll. Wegen dieser Unsicherheiten empfiehlt es sich, das Verfahren mit verschiedenen Varianten durchzuspielen um die Bandbreite der möglichen Ergebnisse auszuloten.

Dem Laufzeitverfahren werden vereinfachende Bedingungen unterstellt:

- Die Niederschlagszeit entspricht der Konzentrationszeit
- Blockregen über das gesamte Einzugsgebiet.

Die gesamte Laufzeit setzt sich aus Oberflächen- und Gerinneabfluss zusammen. Dabei wird für den Oberflächenabfluss die Zeit vom gerinneentferntesten Punkt des Einzugsgebietes ermittelt.

Zuerst ist die Abflussspitze zu bestimmen. Hierfür wird das Einzugsgebiet in mehrere Teilgebiete (TEG) unterteilt (Fig. 9).

Für den zeitlich entlegensten Teil des Einzugsgebiets wird nun die Anlaufzeit des Oberflächenabflusses bestimmt aufgrund von Topographie und der Gleichung von Izzard (1946):

$$t_{ob} = \frac{527 \cdot c \cdot L_{ob}^{1/3}}{J_{ob}^{1/3} \cdot (C \cdot i_T)^{2/3}} \quad [\text{min}]$$

Dabei sind:

C	=	Wasserverlust-Koeffizient	[-]
c	=	Wasserabfluss-Koeffizient	[-]
L _{ob}	=	Weglänge des gerinnelosen Abflusses	[m]
J _{ob}	=	mittlere Hangneigung (Absolutwert)	[-]
i _T	=	mittlere Regenintensität der Wiederkehrperiode T _r	[mm/h]

Tab. 7 Beispiele für den Wasserverlust-Koeffizient C und den Wasserabfluss-Koeffizient c des Oberflächenabflusses (Zeller 1981: 46-48)

Bodenbeschaffenheit	Bemerkungen	Wasserverlust-Koeffizient C
Witenwasserreuss / Realp, Hochwasser 1958, 1960, 1965	11.3% vergletschert	0.41 - 0.57
Göschenenreuss / Abfrutt, Hochwasser 1921, 1922, 1924	22% vergletschert	0.23 - 0.31
Schäche / Bürglen, Hochwasser 1935, 1939	4.2% vergletschert	0.34 - 0.6
Alpnach / Bodenberg, Hochwasser 1965	25.6% vergletschert (Angaben vermutlich verfälscht)	0.6 - 0.75
Stelle Selteneinzugsgebiete der Reuss für Grossereignisse		
Kristalline Gebiete		0.5 - 0.6
Kalk / Dolomit Gebiete		0.4 - 0.5
Flyschgebiete		0.6
		Wasserabfluss-Koeffizient c des Oberflächenabflusses
Asphaltbelag auf Strasse		0.007
Betonbelag auf Strasse		0.012
Mähwiese		0.046
Mähwiese (Flysch der Voralpen bei > 20%)		0.046 - 0.050
Gras, hoch und dicht, auf torfigem Boden		0.060

Für den Gerinneabfluss muss nun die Beziehung $v = f(Q)$ ermittelt werden. In jedem Gerinneabschnitt wird anschliessend die Wassermenge Q und die Gerinnelaufzeit t_G errechnet.

Die totale Laufzeit ergibt sich schliesslich aus:

$$t_{\text{tot}} = t_{\text{ob}} + \sum t_G$$

Die Bestimmung der Gerinnelaufzeit kann anhand des Verfahrens, wie es bei Zeller (1981) beschrieben ist, bestimmt werden, wobei die jeweilige Gerinnegeometrie des Gewässers bekannt sein muss.

Die Bestimmung der k_{St} -Werte bei Verwendung der Strickler-Formel (Verfahren Zeller) ist sehr unsicher. Es wird empfohlen, für den k_{St} -Wert nicht mehr als 10 einzusetzen.

Zur Bestimmung des hydraulischen Radius ($R^{2/3}$) muss die Höhe des Abflusses bekannt sein. Dies kann, wenn der Abfluss bekannt ist, auf graphischem Weg ermittelt werden. Hierfür aber muss für jedes Gerinne eine spezielle Kurve gemäss Fig. 10 erstellt werden, was sehr zeitaufwendig ist.

Nachdem die Fliessgeschwindigkeit bekannt ist, kann nun auch die Fliesszeit zum nächsten Referenzpunkt ermittelt werden. Die Summe sämtlicher Laufzeiten sollte gleich der Niederschlagszeit TR sein, andernfalls muss das ganze Berechnungsverfahren wiederholt werden, bis $t_{tot} = TR$.

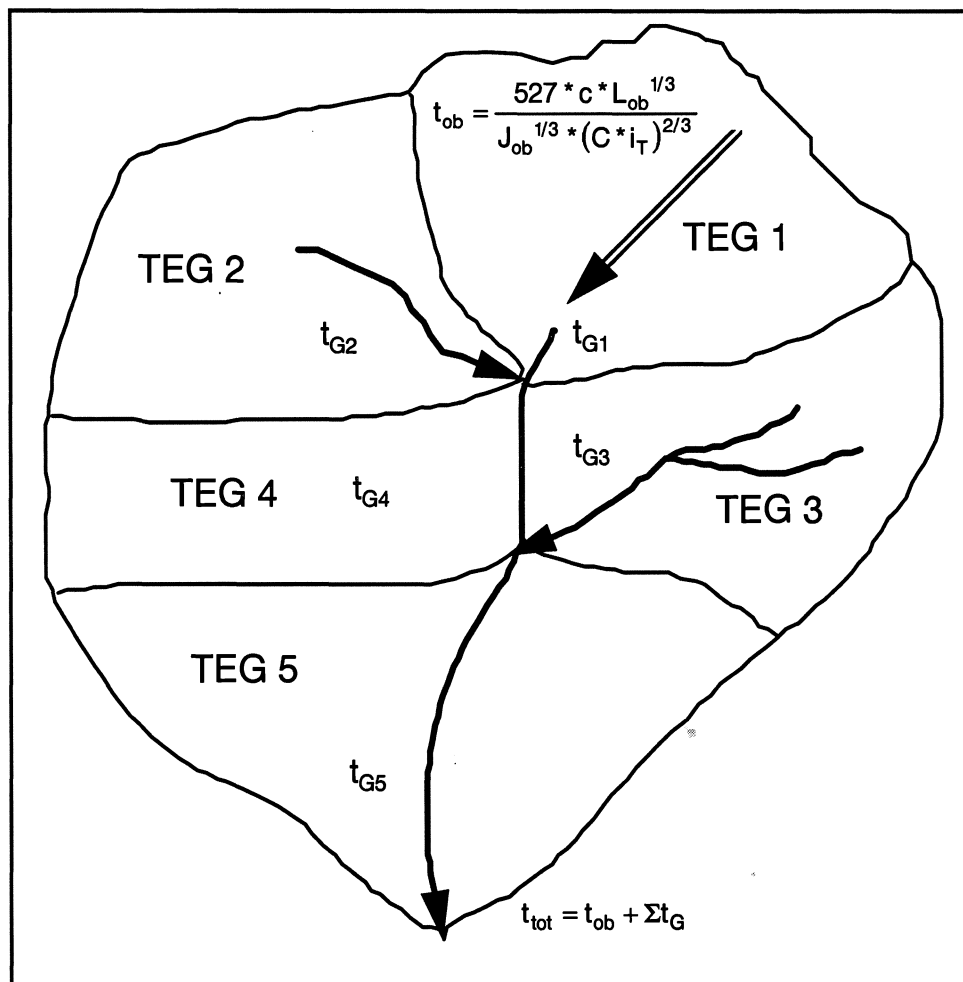


Fig. 9 Aufteilung eines Einzugsgebietes in verschiedene Teileinzugsgebiete

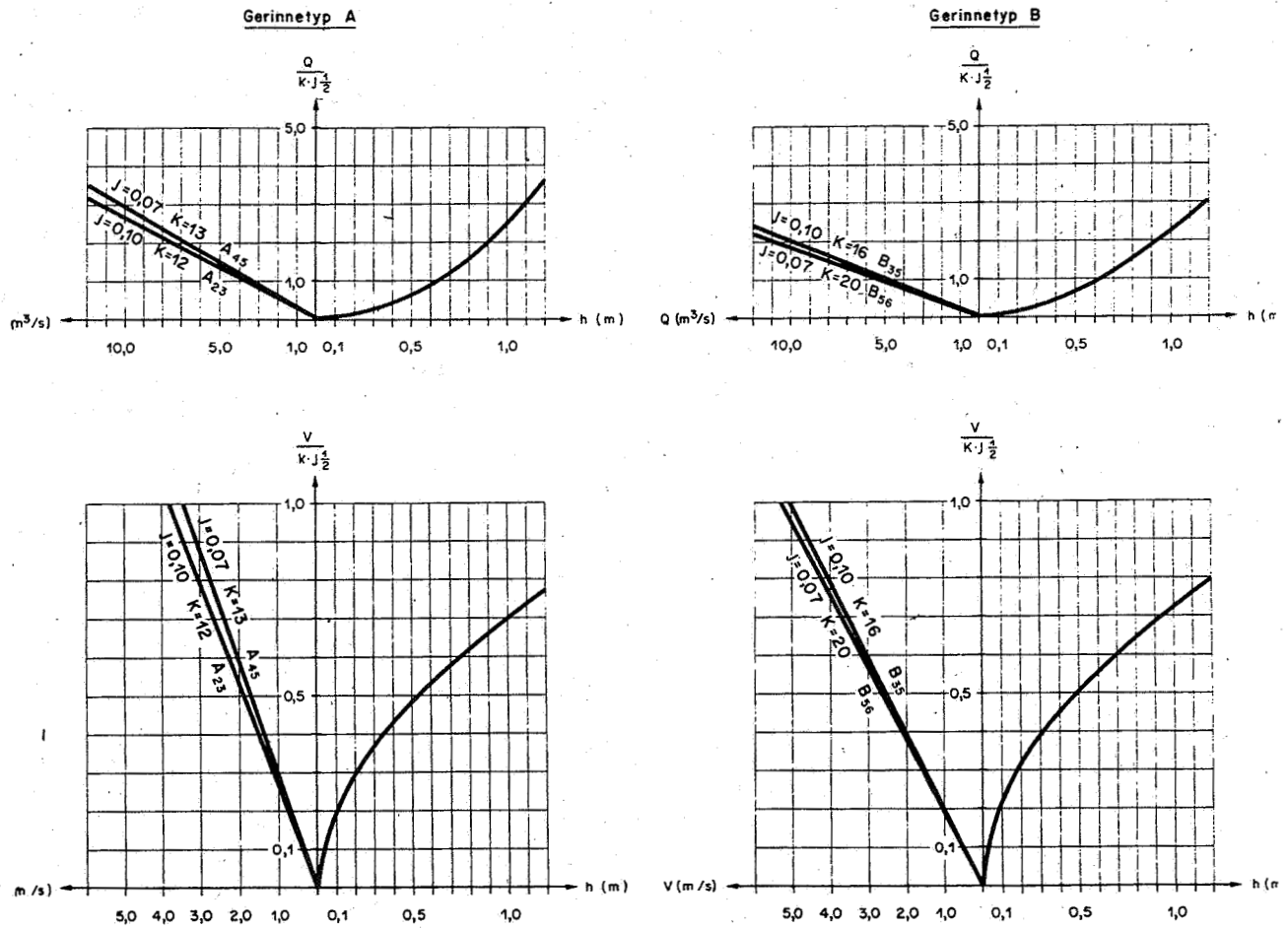


Fig. 10 Diagramme zur Ermittlung der Fließhöhe und -geschwindigkeit

3. Feldaufnahmen

Vergleiche Teil I, Kapitel 4

3.1 Abschätzung der Murfähigkeit im Gelände

Im Gelände ist es oft schwierig, anhand von Spuren zwischen Geschiebetransport und Murgängen klar zu unterscheiden. Oft überlagern sich beide Prozesse örtlich und zeitlich. Im Bereich zunehmender Dichte des Feststoff-Wassergemisches, wie es in steilen Wildbächen vorkommt, sind Geschiebetransport und Murgang auch theoretisch nicht mehr streng auseinander zu halten. Es gibt jedoch einige Merkmale, wie Murgänge erkannt werden können.

3.1.1 Erkennungsmerkmale

a) Levées

Am besten können Levées in grösseren Schutthalden des Hochgebirges beobachtet werden. Die in der Regel schmalen Rinnen weisen dabei eine bobbahn-ähnliche, charakteristische U-Form mit seitlichen Wällen (Levées) auf (Abb. 12). In vielen Wildbachgerinnen sind Levées oft nur

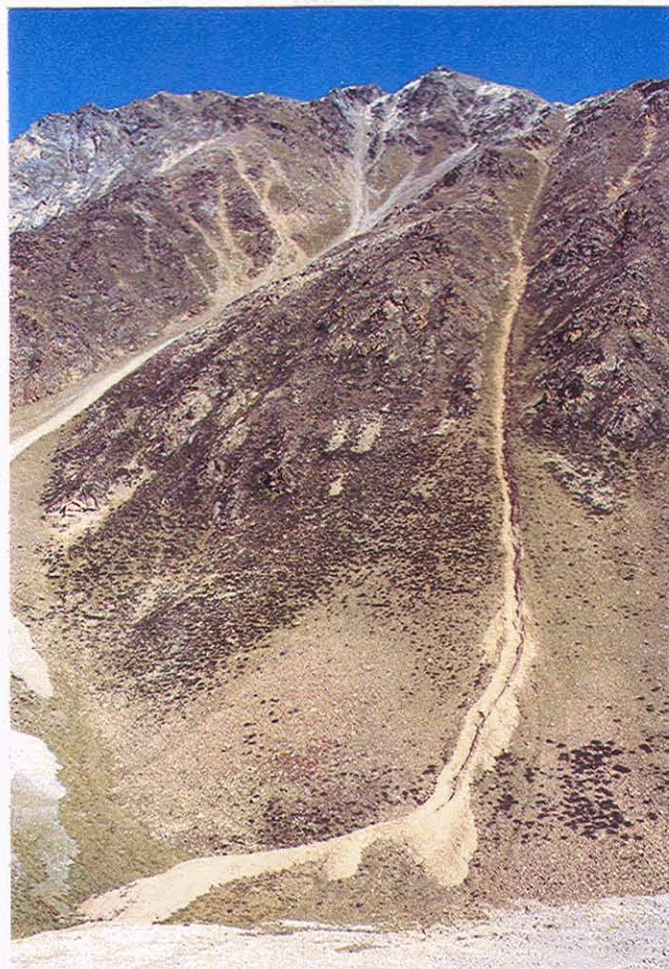


Abb. 12 Murgang mit seitlichen Levées am Umbrail

schwer erkennbar: Die entsprechenden Formen können bereits überwachsen oder durch andere geomorphologische Prozesse überprägt worden sein (Abb. 13). Typisch für diese Levées sind:

- Parabelförmiger Querschnitt
- Keine eigentliche Korngrössensortierung bzw. Schichtung, weder in horizontaler noch in vertikaler Richtung
- Paralleler Verlauf zu einem Zwillingswall an der gegenüberliegenden Gerinneseite
- Kurvenüberhöhung.

b) Grosse Blöcke

Wo Murgänge durchgeflossen sind, finden sich oft grosse Blöcke, welche durch normalen Geschiebetransport nicht verlagert werden konnten. Weisen die Blöcke gerundete Kanten auf, sind sie durch den Bach selbst an die betreffende Stelle transportiert worden. Dies kann tatsächlich durch einen Murgang erfolgt sein. Es ist aber auch möglich, dass grosse Blöcke durch Unterspülung destabilisiert werden und jeweils geringe Distanzen bachabwärts kollern.

Ist keine Zurundung an den Kanten sichtbar, kann der betreffende Block jedoch aus dem umliegenden Hangbereich stammen.



Abb.13 Überwachsenes Levée im Mülibach bei Hergiswil, Nidwalden

c) Murköpfe

In murfähigen Wildbächen mit häufiger Feststoffverlagerung sind oft Murköpfe zu beobachten. Es handelt sich hier um die steile Ablagerungsfront eines Murganges. Ein Murgang kommt infolge verschiedener Ursachen zum Stehen, beispielsweise durch:

- Kollision mit einem Hindernis
- plötzlichen Wasserverlust
- Gefällsverminderung im Gerinne.

d) Form des Querprofils

Ein U-förmiger Gerinnequerschnitt weist oft auf Murgänge hin. Die U-Form kann jedoch im Laufe der Zeit durch Böschungsaktivitäten überprägt werden, womit letztlich beinahe ein V-förmiger Gerinnequerschnitt entsteht.

3.1.2 Mögliche Entstehungsorte für Murgänge

Auch wenn Spuren von Murgängen fehlen, können verschiedene kritische Stellen im Gerinne auf die Möglichkeit künftiger Murgänge (infolge zeitweiligen Materialaufstaus mit anschliessendem Durchbruch) hindeuten. Dazu gehören

- Felsvorsprünge, welche das Gerinne deutlich verengen
- eine grössere Anhäufung grobblockigen Materials
- Hangprozesse mit Materialeintrag aus der Seite
- Seitengerinne und/oder Runsen mit Materialeintrag und
- enge Durchlässe.

Die Erfahrung zeigt, dass bereits kleinere Verklausungen zu Ausbrüchen oder Durchbrüchen und möglicherweise der Bildung eines Murganges führen. Ein Murgang kann sich anschliessend über längere Distanzen fortbewegen.

Häufig kommt es vor, dass sich das Feststoff- oder Abflussregime eines Wildbachs im Laufe der Zeit verändert oder durch bestimmte Faktoren (z. B. durch Entstehung neuer grösserer Geschiebeherde im Gerinnebereich oder mittels Einbau grösserer wasserbaulicher Werke) beeinflusst wird. Dies kann sich auf den Feststoff-Verlagerungsprozess auswirken. In diesem Fall sind die vorhandenen Spuren umso sorgfältiger zu interpretieren. Ein Beispiel dieser Art ist der Steinibach in Hergiswil (Nidwalden), welcher seit dem Murgangereignis von 1979 praktisch vollständig verbaut worden ist und wo sich heute im Vergleich zu vorher eine gänzlich neue Situation bezüglich der Feststoffverlagerung ergeben hat.

3.2 Aufnahmen in nicht murfähigen Wildbächen

3.2.1 Aufnahme der Parameter für die Berechnung der Transportkapazität

Die Berechnung der Transportkapazität erfordert grobe Vereinfachungen der Vorgänge in der Natur, so dass die Resultate jeweils kritisch zu betrachten sind. Zur Erhebung der Parameter sind einige Punkte wichtig:

- Die Aufnahme der Parameter im Feld erfolgt immer punktuell an einer 'repräsentativen' Stelle. Sie werden als repräsentativ für eine bestimmte Gerinnelänge angenommen.
- Ein klar definiertes Längen- und Querprofil ist in keinem Wildbach vorhanden.
- In der Natur existiert keine klar definierte seitliche Gerinnebegrenzung konstanter Rauigkeit wie im Labor.
- Das transportierte Material weist in der Natur praktisch von Meter zu Meter verschiedene Grössen-, Form- und Dichteverhältnisse auf.

a) Querprofil

Für die Aufnahme von Querprofilen sind die massgebliche Gerinnebreite und die Böschungswinkel für den Fall des Hochwassers zu bemessen. Die vorberechnete Abflussspitze des Referenzereignisses kann Hinweise auf die vermutlich benetzte Fläche des Querprofils geben. Die Gerinnebreite kann bei Einsatz mehrerer Personen mit einem Messband, oder bequemer, mit Hilfe eines Telemeters bestimmt werden. Gemessen wird quer zur Fliessrichtung von Böschungsfuss zu Böschungsfuss.

b) Gefälle

Das Gefälle ändert in Wildbächen praktisch von Meter zu Meter. Der Wahl des geeigneten Messstandortes kommt deshalb einige Bedeutung zu. Die Wahl des Messstandortes ist bei abgestuften Längsprofilen problematisch, weil das "mittlere Gefälle" in keiner Weise den wirklichen Verhältnissen entspricht. Oft werden kleinere sog. Step-pool-Sequenzen bei einem grossen Hochwasser ausgegattet. Strecken mit einer grobblockig abgepflasterten, ausgeprägten Step-pool-Abfolge können aber auch äusserst stabil sein.

c) Korngrössenzusammensetzung der Sohle

Für die Durchführung von Geschiebeanalysen steht ein Verfahren zur Verfügung, welches sowohl die Korngrössenzusammensetzung der Deck- wie auch der Unterschicht erfasst (Fehr 1987). Das Verfahren kann auch für die recht heterogene Sohlenzusammensetzung von Wildbächen angewendet werden. Für die Erfassung des Deckschichtmaterials wird eine Linienprobe, für das Unterschichtmaterial entweder eine Volumenprobe durchgeführt oder eine sogenannte Fullerverteilung angenommen. Das Vorgehen im Gelände ist auf Seite 35 in Teil I beschrieben.

Die bei der Durchführung von Korngrössenanalysen auftretenden Probleme sind im Prinzip gering. Falls für die Unterschicht anstelle der Fuller-Verteilung eine Volumenprobe vorgezogen wird, sind die folgenden Punkte wichtig:

- Die Vermischung feuchter (Grundsicht) und trockener (Deckschicht) Proben ist methodisch nicht ganz korrekt. Besonders beim Feinmaterial ist der Gewichtsanteil Wasser höher als beim Geschiebe.
- Der ausgewählte Standort hat einige Bedingungen zu erfüllen:
 - Lage in Fliessrichtung
 - Repräsentativität der Ergebnisse aus der Linienzahlanalyse für den betreffenden Standort.
- Bei Durchführung der Volumenproben ist auf folgendes zu achten:
 - Vermeidung von Probenentnahmen in Sandlinsen unter der Deckschicht
 - Auswaschung der ersten paar Siebdurchgänge im Wasser, um die Trennung der durch die Feuchtigkeit aneinandergekitteten Partikel zu erreichen.

Der zeitliche Aufwand für die Erhebung an einem Standort (je drei Linien- und Volumenproben) beträgt mehr als zwei Stunden (netto) für zwei Personen. Dabei muss für eine Linienzahlanalyse etwa eine halbe Stunde aufgewendet werden. Für die Volumenprobe ist der Aufwand abhängig von Umfang und Material. Braucht man nur noch zu sieben, benötigt man ca. 15 Minuten.

3.2.2 Erfassung der relevanten Feststoffherde

Die folgenden Angaben für die einzelnen Geschiebeherde beziehen sich auf die Tabelle "Vorschläge zur Abschätzung des Feststoffpotentials einzelner Geschiebeherde" im Anhang von Teil I.

A) Schätzung des Feststoffpotentials der Gerinnesohle

a) Gerinnesohle aus Lockermaterial

Die Abschätzung der erodierbaren Materialmenge erfolgt generell wie in Teil I, Kapitel 4.3 beschrieben. Folgendes ist besonders zu beantworten resp. zu beachten:

- Gerinnecharakter
Handelt es sich um eine Erosions-, Umlagerungs-, oder Akkumulationsstrecke?
- Gefälle
Ist das Gefälle im betrachteten Gerinneabschnitt kleiner als im oberen Gerinneabschnitt, ist in der Regel auch die Erosion kleiner. Zusätzlich ist, vor allem bei lokalen Gerinneverbreiterungen, die Möglichkeit von Ablagerungen zu beurteilen.

- Hindernisse
wie Felsvorsprünge, Felsblöcke usw., reduzieren die Erosion. Dieser Effekt ist mittels Korrekturfaktor zu berücksichtigen!
- Abpflasterung der Sohle
Grosse Blöcke können die Sohle derart stabilisieren, dass bei normalem Geschiebetransport keine Sohlenerosion zu erwarten ist.

Es können folgende Erosionswerte angenommen werden:

- Für Geschiebetransport:
Der Eintiefungsbetrag entspricht ungefähr dem d_{90} des Sohlenmaterials, wobei erfahrungsgemäss folgendes Verhältnis nicht überschritten wird:

$$\frac{\text{Eintiefung}}{\text{Gerinnebreite}} \approx \frac{1}{12} \text{ bis } \frac{1}{10}$$

Bei einem 6 Meter breiten Gerinne dürfte die Tiefenerosion demnach ca. 50 cm im Durchschnitt ausmachen.

Bei Gefällen von weniger als 10% reduziert sich die durchschnittliche Tiefenerosion.

- Für Murgänge:
Hier ist etwa mit folgendem Verhältnis zu rechnen:

$$\frac{\text{Eintiefung}}{\text{Gerinnebreite}} \approx \frac{1}{5} \text{ bis } \frac{1}{3}$$

wobei der letztere Wert nur für sehr erosionsanfälliges Material oder für Hangmurgänge zu verwenden ist. Bei geringem (< 10%) und sehr hohem Gefälle (> 50%) ist die Tiefenerosion kleiner.

b) Gerinnesohle aus Festgestein

Hier sind vor allem Zwischenablagerungen bei Gerinneverflachungen oder -verbreiterungen zu beachten. Sie sind in der Regel geringmächtig und über die Gesamtbilanz betrachtet vernachlässigbar. In Gerinneabschnitten aus Festgestein besteht eine ausgeglichene Feststoffbilanz (Feststoffinput = Feststoffoutput).

Infolge des vergleichsweise geringen Mobilisierungspotentials im Festgestein müssen Geschiebetransport und Murgänge beim Berechnungsvorgang nicht unterschieden werden. Mögliche Korrekturfaktoren für die Berechnung der erodierbaren Länge (vgl. Teil I) sind:

- Bei abgetreptem Längenprofil : $k_1 = \text{ca. } 0.3 \text{ bis } 0.5$.
Dabei werden Zwischenablagerungen auf den einzelnen Stufen angenommen, welche erodiert werden können.
- Bei gestrecktem Längenprofil mit starkem Gefälle (> 20%) ist die Erosion vernachlässigbar: $k_1 = 0$, keine Zwischenablagerungen (Abb. 14).
- Bei geringem Gefälle (< 10%) sind fallweise einzelne kleinere Zwischenablagerungen möglich. Diese Zwischenablagerungen werden auch bei kleineren Hochwassern umgelagert.

Bei Zwischenablagerungen grösserer Mächtigkeit z. B. infolge von Steinschlag oder anderen Hangprozessen kann das erodierbare Volumen lokal grössere Ausmasse annehmen.

c) Gerinnesohle aus veränderlich-festem Gestein

Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass kleinere Sohlenpartien und exponierte Stellen aus veränderlich-festem Fels auch erodiert werden können. Im Hinblick auf die Gesamtfracht am Kegelhals dürfte die betreffende Kubatur in der Regel jedoch nicht ins Gewicht fallen.



Abb. 14 Felsgerinne im Meerenbach, Kanton Glarus

B) Feststoffherde im Gerinnebereich (Böschung)

Diese Kategorie umfasst sämtliche Feststoffherde, welche sich im unmittelbaren Bereich des Hochwassers im Haupt- oder einem Nebengerinne befinden. Typisch für diese Feststoffherde sind Nachböschungsvorgänge, d. h. Nachrutschen von Hangpartien ins Gerinne infolge Unterspülung (Abb. 15).

a) Lockermaterial: Typ alte (eiszeitliche) Talverfüllung

Diese Feststoffherde sind nur punktuell und in relativ wenigen Wildbächen von Bedeutung. Wo aber nach dem Rückzug der Talgletscher enge Kerbtäler in periglaziären Talverfüllungen entstanden, sind die nicht ausgeräumten Lockergesteinsreste wichtige potentielle Geschiebeherde.

Die Feststofflieferung des gerinnenahen Bereichs unterscheidet sich nach Prallhanglage (grössere erodierbare Mächtigkeit) und 'normaler' Böschungslage (längs des +/- gestreckten Gerinnes). Die Korngrössenverteilung des eingetragenen Materials kann stark variieren.

Bei Prallhanglage sind Mächtigkeiten bis über 1 Meter ohne weiteres möglich, wobei die erodierbare Mächtigkeit etwa den grössten vorgefundenen Gesteinskomponenten entsprechen dürfte.

Bei normaler Böschungslage beträgt die durchschnittliche Mächtigkeit bis ca. 0.5 Meter .

b) Lockermaterial: Typ Moräne, mittelmässig bis stark verfestigt

Bei Grundmoränen ist infolge der meist starken Verfestigung nur mit geringen Erosionsmächtigkeiten zu rechnen (ca. 0.1 - 0.5 Meter).

Aus Moränenwällen können sich grössere Schuttmassen loslösen. Teilweise sind sie im Zusammenhang mit der Auslösung von Murgängen von Bedeutung, z. B. während der Ereignisse des Jahres 1987 in der Schweiz.

c) Lockermaterial: Typ alte verfestigte Ablagerungen (Erosions- bzw. Terrassenränder)

Die erodierbare Mächtigkeit pro Ereignis beträgt im Durchschnitt bis 0.5 Meter, bei Murgängen sind Meterbeträge möglich.

d) Lockermaterial: Typ Hang- und Verwitterungsschutt

Annahmen für die Erosion bei Geschiebetransport:

Entlang des Gerinnes: $k_f = 0.3$ bis ca. 0.5 der Gerinneabschnittslänge (v.a. an Prallhängen), Höhe ca. drei bis sechs Meter. Mächtigkeiten in der Regel 0.3 bis 0.5 Meter (Abb. 15).

Für die Erosion bei Murgängen:

Hier können etwas höhere Erosionsbeträge angenommen werden. Erosionshemmende Objekte wie grosse Blöcke oder Felsvorsprünge werden mittels Längen- oder Reduktionsfaktor einberechnet. Die durchschnittlichen Mächtigkeiten können, durch erhöhte Erosionskraft des Murganges, bis über 1 m erreichen.

Bei der Abschätzung der Mächtigkeit ist auch immer die Lage eines evtl. vorhandenen felsigen Untergrundes als Erosionsgrenze mitzubersichtigen.



Abb. 15 Charakteristische Form eines Uferanbruchs, Ri di Cavanna, Bedrettotol, Kanton Tessin

e) Lockermaterial: Typ d_{90} deutlich gröber als dasjenige im Gerinne (z. B. Sturzschutt)

Berechnung der mobilisierbaren Kubatur wie beim Hangschutt/Verwitterungsschutt, evtl. mit reduziertem Längenfaktor.

f) Lockermaterial: Typ rezenter Bach- und Murschutt aus Runsen und Seitengerinnen

Berechnung prinzipiell in gleicher Weise wie Verwitterungsschutt, wobei die Mächtigkeit der erodierbaren Schicht im Falle eines Murganges bis ca. 1.5 m betragen dürfte. Kleinere rezente Ablagerungskegel dürften beim Grossereignis vollständig erodiert werden.

g) Lockermaterial: Typ Schwemmkegel des Hauptgerinnes

Berechnung prinzipiell wie Bach- und Murschutt. In jungen Kegeln, die noch wenig verfestigt sind, können Murgänge im Extremfall mehrere Meter erodieren.

h) Festgestein, unbewachsen

Zur Berechnung vgl. 'Runsen'.

i) Festgestein, veränderlich-fest, unbewachsen

Intensive Niederschlagsereignisse können in stark verwitterten Partien grössere Gesteinspakete herauslösen. Allerdings werden die oft brüchigen Komponenten im Gerinnebett in kurzer Zeit zu Feinmaterial zerrieben und können deshalb vernachlässigt werden.

Ist der Feststoffherd durch Runsen mit dem Gerinne verbunden, entspricht der Materialeintrag in das Gerinne dem Feststoffpotential einer Runse. Schuttkegel, welche sich am Gerinne unterhalb des Feststoffherdes aufgebaut haben, können je nach Korngrössenzusammensetzung teilweise oder ganz erodiert werden.

j) Festgestein, fest oder veränderlich-fest, bewachsen

Der oft flachgründige Boden kann mitsamt Vegetation entlang der Felsoberfläche ganz oder teilweise abrutschen und ins Gerinne gelangen.

Die Mächtigkeit der voraussichtlich abrutschenden Bodenschicht ist sehr gering, durchschnittlich 0.1-0.2 Meter.

C) Feststoffherde im Hangbereich**a) Selbständige Hangprozesse**

Folgende Erfahrungswerte können angegeben werden:

- Für flachgründige Rutschungen
Für die Abschätzung der Mächtigkeit sind Hinweise auf Gleithorizonte oder die Mächtigkeit der Lockermaterialmasse bis zum Anstehenden zu beachten. Bei grösserer Ausdehnung einer Rutschung kann mit einer Mächtigkeit bis ca. 1.5 Metern gerechnet werden.
- Für mittelgründige Rutschungen
Mächtigkeiten bis ca. 10 Metern (laut Definition)
- Für tiefgründige Rutschungen
Die erodierbare Mächtigkeit ist nicht problemlos abzuschätzen. Gerade Rotationsrutschungen (z. B. infolge "Hangexplosion") können im Verhältnis zur in Bewegung geratenen Fläche sehr tief sein (bis über 10 m oder mehr). Hinweise sind evtl. mit relativ aufwendigen Methoden wie z. B. Seismik oder Bohrungen zu erhalten. Meistens erfolgen tiefgründige Bewegungen aber unabhängig vom Hochwasser im Wildbach.

Bei grösseren Rutschungen ($> 500 \text{ m}^3$) ist zu berücksichtigen, dass eventuell nicht die gesamte Bewegungsmasse gleichzeitig und sofort in das Gerinne gelangt. Je nach Aufnahmefähigkeit des Gerinnes (Querschnitt und Gefälle) bleibt ein Teil der abgerutschten Feststoffmasse vorerst liegen.

(Die Erfahrung zeigt, dass etwa ein Drittel oder ein Viertel der Masse auf diese Weise zwischengelagert wird.)

b) Runsen

Bei Runsen ist generell abzuschätzen, ob sie primär als Transportweg für Material aus höher oben liegenden Geschiebeherden dienen oder ob sie einen eigenen Geschiebeherd darstellen (Abb. 16). Für die Abschätzung des Feststoffpotentials sind folgende Überlegungen hilfreich:

- Beurteilung der Mächtigkeit des Lockermaterials im betreffenden Hangbereich
- bei gestuftem Längenprofil der Runse können Zwischendeponien zusätzlich erodiert werden
- ein schwach ausgeprägtes Querprofil weist manchmal auf geringe Erosionstendenz hin.

c) Zur Zeit inaktive Hangbereiche

Auch nach langjährigem Stillstand können Hänge und Böschungen plötzlich in Bewegung geraten. Gründe können aussergewöhnliche Niederschlagsintensitäten und -mengen oder ein stark ansteigender Hangwasserdruck sein.

Es ist für diesen Fall nicht möglich, Angaben über die voraussichtlich bewegte Masse zu machen. Das hauptsächliche Volumen dürfte jedoch zwischen Anrisspunkt (oft bei Hangkanten) und Übergang in einen konkaven Hangbereich erodiert werden (Fig. 11).

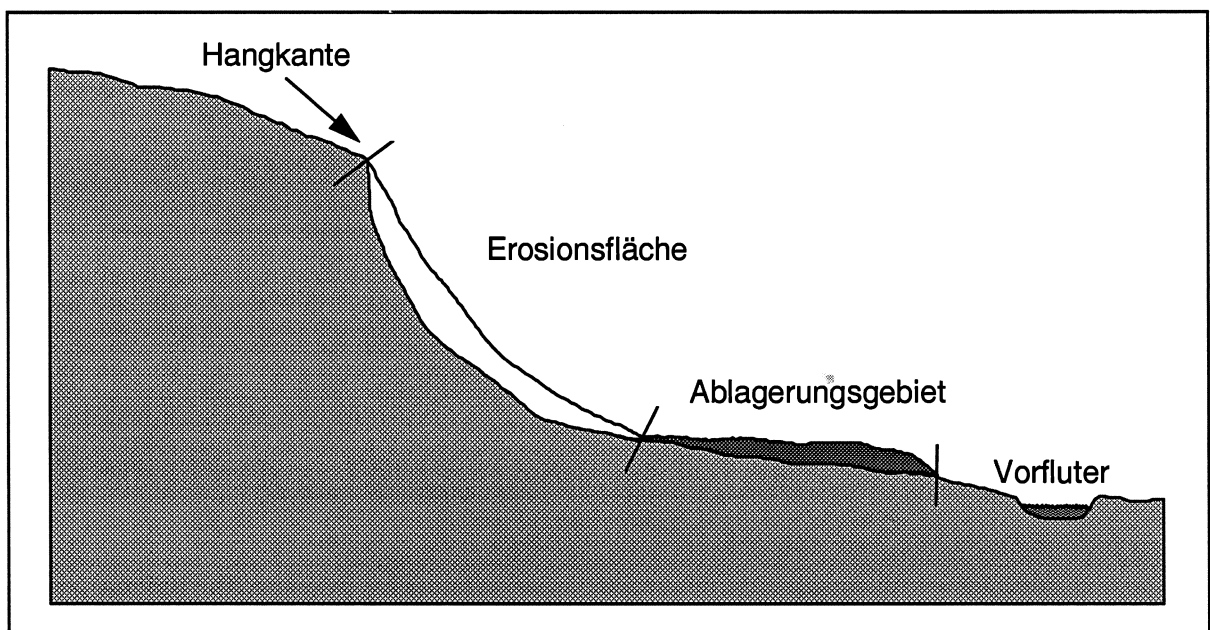


Fig. 11 Schema einer Hangrutschung

Drei Fragenkreise stehen im Vordergrund:

In welchem Gelände sind Massenbewegungen für das Gerinne überhaupt relevant?

Durch genauere Betrachtung des Geländes ist ein grosser Teil der Einzugsgebietsfläche bereits zum vornherein auszuschliessen:

- Gebiete ausserhalb der geschieberelevanten Fläche
- Flächen aus Festgestein

- Flächen, welche die zur Massenverlagerung erforderliche Mindestneigung (ca. 20°) nicht überschreiten
- konvexe Geländeformen mit geringer Lockermaterialüberdeckung.

Gewisse Flächen und Geländeformen sind hingegen als potentiell gefährdet einzustufen:

- Flächen aus Lockermaterial mit einer Mindestneigung für selbständige Massenverlagerungen (ca. 30°)
- konkave Geländeformen wie beispielsweise grössere Mulden, in welchen sich viel Wasser ansammeln kann
- (unbewachsene) Schutthalden mit direktem Anschluss an das Gerinne.

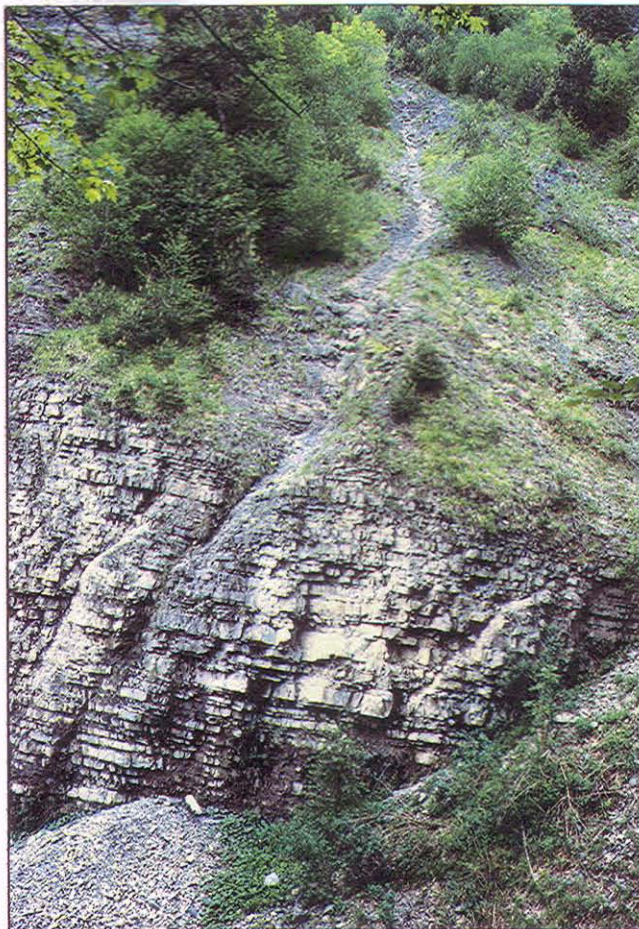


Abb. 16 Runse im Einzugsgebiet Kummetbach, Kanton Uri

Mit welcher Art von Massenbewegungen ist zu rechnen?

Je nach Oberflächenstruktur des Hanges können Annahmen über die potentiellen Prozesse getroffen werden. Folgende Fragen sind wichtig:

Bestehen präformierte Hangbereiche, in welchen sich Murgänge bilden können?

Gibt es im Gelände Hinweise, welche auf Rutschungen hindeuten?

Ist die Lockermaterialschicht geringmächtig, so dass lediglich mit flachgründigen Rutschungen gerechnet werden muss?

Mit welcher Wahrscheinlichkeit erreicht das Material das Gerinne?

Die Wahrscheinlichkeit des Massentransports in das Gerinne steigt mit

- abnehmender Distanz des Anrisspunktes zum Gerinne
- zunehmendem Gefälle des zurückzulegenden Weges
- Fehlen grösserer Ablagerungsmöglichkeiten (Abtreppungen) für Feststoffe.

3.3 Aufnahmen in murfähigen Wildbächen mit Möglichkeiten der Zwischenlagerung von Feststoffen

In solchen Gewässern ist eine rechnerische Erfassung sehr problematisch. Faustformeln, z.B. zur Berechnung der Murenfracht, dürfen daher nie alleine zu Prognosezwecken verwendet werden. Hierfür ist eine detaillierte Erhebung im Gelände durchzuführen. Es stehen aber auch hier nur Schätzverfahren zur Verfügung.

In bezug auf mögliche Anrissstellen im Gelände können die folgenden Überlegungen helfen:

- Die Entstehung eines Murganges erfordert eine gewisse Wassermenge. Ein Murgang enthält mindestens ca. 20% Wasser, wobei eine maximale Dichte des Gemisches von fast 2.5 t/m³ erreicht wird.
- Es muss genügend Lockermaterial vorhanden sein, damit ein Murgang entstehen kann.
- Damit sich ein Murgang in Bewegung setzt, ist im Gerinne ein Minimalgefälle von ca. 25% erforderlich, im Hang dagegen wird von ca. 27° ausgegangen (vgl. Tab. 3).

Das Erosions- und Fliessverhalten kann folgendermassen abgeschätzt werden:

- In einem Gerinneabschnitt, welcher ein geringeres Gefälle als der nächstobere aufweist, nimmt die Masse des Murgangs unter folgenden Bedingungen nicht zu:
 - Gefälle von weniger als 23% (minimales Gefälle, bei welchem die Auslösung von Murgängen in einem Fall beobachtet worden ist VAW 1992) *und*
 - deutliche Gefällsabnahme im Vergleich zum oberen Abschnitt ($\Delta J > 5\%$) *oder*
 - ein über eine längere Strecke (> 100 m) konkaves Längsprofil, welches an seiner flachsten Stelle deutlich weniger als 20% Gefälle aufweist.
- Unterhalb einer Gefällskante setzt die Materialaufnahme wiederum ein. Das Ausmass dieser Erosion hängt von der bisherigen Entwicklung des Murganges ab und ist im konkreten Fall schwierig zu beurteilen.
- Das Pauschalgefälle - d. h. das durchschnittliche Gefälle vom Anrisspunkt bis zum unteren Ende der Ablagerungen - muss für Murgänge mindestens 19% betragen, für kleine Einzugsgebiete ist das Minimalgefälle höher (vgl. Fig. 12).

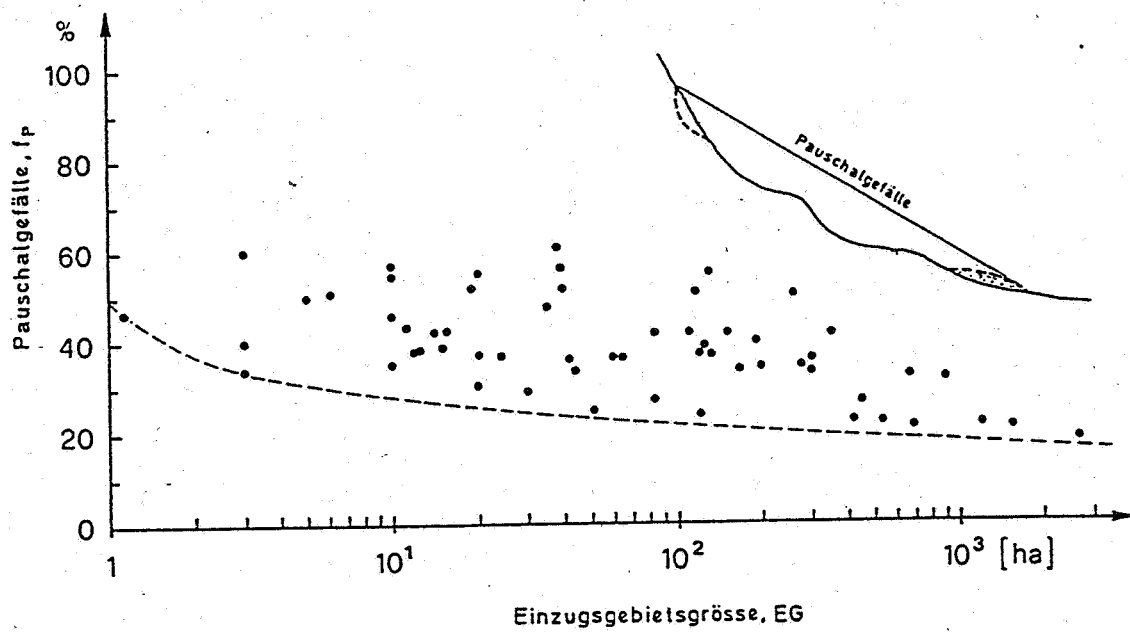


Fig. 12 Pauschalgefälle von Murgängen anlässlich der Unwetter 1987 (VAW 1992)

4. Auswertung der Feldaufnahmen

Vergleiche Teil I, Kapitel 5

4.1 Auswertung bei nicht murfähigen Wildbächen

4.1.1 Analyse des Sohlenmaterials

Für die Bestimmung der charakteristischen Korngrößen d_{90} , d_{50} und d_{30} wird die Zusammenlegung der Linienzahlanalyse mit einer Verteilung nach Fuller als zweckmässig erachtet. Das Vorgehen ist in Fig. 13 aufgezeichnet.

Ziel der Umrechnung ist die Umformung der Daten der Linienprobe in eine volumetrische Form. Zuerst wird der charakteristische Durchmesser jeder Fraktion bestimmt. Nach der Berechnung der fraktionsweisen Summenprozente ergibt deren Differenz die Prozentanteile jeder Fraktion. Die Umwandlung in die volumetrische Dimension erfolgt mit einem durch Laborexperimente von Anastasi (1984) und Fehr (1987) ermittelten Exponenten $\alpha = 0.8$, welcher die hydraulische Belastung berücksichtigt.

Da die Linienprobe die Feinanteile nur ungenügend berücksichtigt, sind die Feinanteile mit einem Korrekturfaktor $c = 0.25 + 0.75$ zusätzlich zu gewichten.

Das Ergebnis entspricht der Verteilungskurve einer umgerechneten, mit einer Fullerkurve zusammengelegten Linienzahlanalyse. Die Ergebnisse der Geschiebeanalysen im Felde liegen nun in Form einer Verteilungskurve mit logarithmischer x-Achse vor. Die massgebenden Korngrößen d_{90} , d_{50} und d_{30} können nun direkt abgelesen werden.

4.1.2 Berechnung der Feststoffbilanz für jedes Querprofil

Das Ergebnis aus der Berechnung der Feststoffbilanz kann anhand von Fig. 14 in Teil I kontrolliert werden. Fig. 14 ist das Ergebnis der Auswertung von Frachten bekannter früherer Wildbachereignisse in der Schweiz. Es wurden Ereignisfrachten der vier geologischen Kategorien Molasse, Flysch, Helvetische Alpen und Kristallin unterschieden. Die Einteilung erfolgte im Bewusstsein, dass diese geologische Vereinfachung problematisch ist und den differenzierten geologischen Merkmalen der meisten Einzugsgebiete nur ansatzweise gerecht wird. Aufgrund der heute zur Verfügung stehenden ungenügenden Datenlage ist eine weitere Differenzierung jedoch nicht sinnvoll. Zusammengefasst ergibt sich aus dieser Auswertung folgendes Bild:

- Die spezifischen Ereignisfrachten sind in der Molasse (Mittelland) in der Regel kleiner als im alpinen Raum. Dies hängt teilweise mit einer geringeren Reliefenergie (Gefälle des Längsprofils, Möglichkeit von Zwischendeponien), teilweise vom Verlagerungsprozess (in der Regel Geschiebetransport) ab.
- In den Helvetischen Alpen sind geringere Frachten zu erwarten als in Kristallin- und Flyschgebieten. Aufgrund der Daten ist für den Flysch keine Abhängigkeit der spezifischen Feststofffracht von der Einzugsgebietsgrösse zu erkennen. Für Einzugsgebiete über 10 km² müsste jedoch auch hier eine Reduktion der spezifischen Feststofffracht angenommen werden.

4.2 Auswertungen bei murfähigen Wildbächen mit Möglichkeiten der Zwischenlagerung von Feststoffen

Neben Fig. 14 in Teil I kann eine Kontrolle des Ergebnisses auch mittels Faustformeln vorgenommen werden.

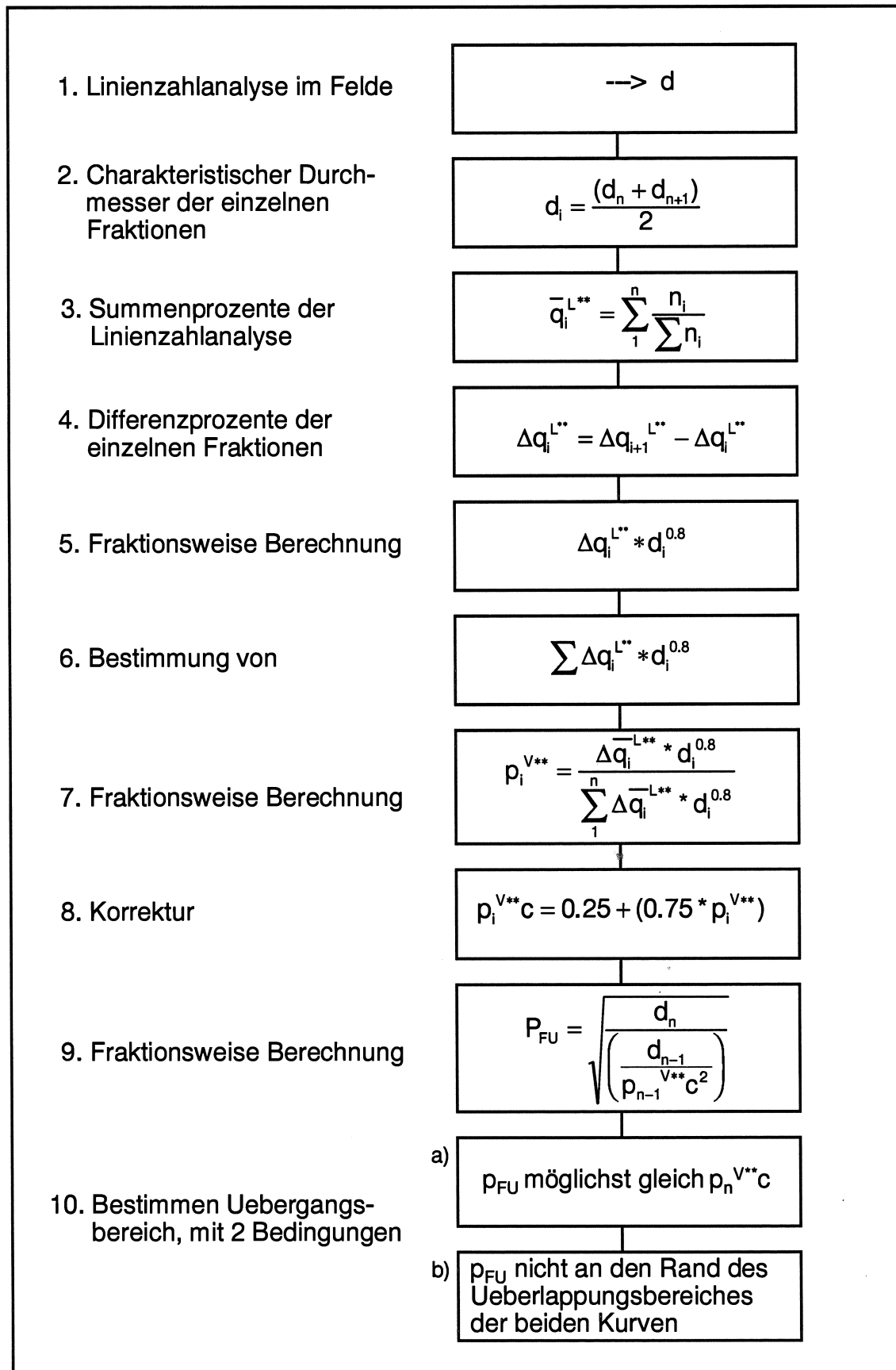


Fig. 13 Vorgehen zur Zusammenlegung einer Linienzahlanalyse mit einer Fullerkurve

Legende zu Fig. 13:

d_i	=	mittlerer Korndurchmesser einer Fraktion i
$\bar{q}_i^{L**}$	=	Summenprozente der Linienzahlanalyse
L	=	Index für die Linienzahlanalyse
n	=	Koeffizient bzw. Anzahl
i	=	Index einer Fraktion
n_i	=	Anzahl Steine der Fraktion i
p_i	=	Summenhäufigkeit der Fraktion i
V	=	Index für die (hier fiktive) Volumengewichtsanalyse
p_{FU}	=	Fullerkurve
$**$	=	Zusatzindex zur Bezeichnung einer partiellen Analyse, welche primär die Grobanteile berücksichtigt
c	=	Formfaktor

Viele Berechnungsverfahren zur Abschätzung der Feststofffracht sind empirisch hergeleitet und weisen eine räumlich beschränkte Gültigkeit auf. Sie können aufgrund der verschiedenen Ausgangsparameter oft nicht direkt untereinander verglichen werden. Aus diesem Grunde und aus der Überlegung heraus, dass damit eine generell hohe Unsicherheit verbunden ist, sollten derartige Berechnungen nie isoliert durchgeführt, sondern allenfalls als Hilfsmittel und zur Plausibilitätskontrolle von Felderhebungen eingesetzt werden.

4.3 Zeitbedarf für die Durchführung der Arbeiten

Der Aufwand für die Ausführung der gesamten Arbeiten ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- Erfahrungsgrad und Arbeitsweise der einzelnen Bearbeiter
- Verfügbarkeit und Umfang des bestehenden Dokumentationsmaterials
- Anfahrtswege zum Einzugsgebiet sowie Begehrbarkeit
- Grösse des Einzugsgebietes
- Länge der zu begehenden Gerinnestrecken.

Der Zeitbedarf für einige ausgewählte Einzugsgebiete, welche anlässlich der Vorbereitung dieser Anleitung untersucht worden sind, ist in Tab. 8 zu ersehen. Für wenig erfahrene Bearbeiter ist mindestens in der Anfangsphase genügend Zeit einzuräumen. Jedoch sollte es auch in diesem Falle möglich sein, sämtliche Arbeiten für kleinere Einzugsgebiete ($< 10 \text{ km}^2$) innerhalb Wochenfrist (Nettoarbeitszeit) durchzuführen.

Tab. 8 Netto-Zeitbedarf zur Abschätzung der Ereignisfracht in Wildbächen

Bach	E (km ²)	KG (km)	Vorarbeiten (Tage)	Feldarbeiten (Tage)	Auswertung (Tage)	Total (Tage)
Kummetbach, UR	5.5	14.1	1	2	1½	4½
Palanggenbach, UR	10.8	29.0	1	2	1½	4½
Gruonbach, UR	7.7	28.0	1	2½	1½	5
Meerenbach, GL	9.1	11.2	½	1	1	2½
Bildjibach, GR	1.2	2.7	¼	¾	½	1½

E = Einzugsgebiet, KG = Kumulative Gerinnelänge nach Koella (1986)

5. Fallbeispiele

Im folgenden werden zwei Beispiele dargestellt: Sandbach bei Grindelwald als nicht murfähiger Wildbach, und Mühlbach bei Hergiswil als murfähiger Wildbach mit Ablagerungsmöglichkeiten.

5.1 Sandbach bei Grindelwald

5.1.1 Vorarbeiten

Für das ca. 2.6 km² grosse Einzugsgebiet des Sandbachs sollten die Vorarbeiten nicht länger als einen Arbeitstag in Anspruch nehmen. Das Einzugsgebiet ist auf der Karte (Fig. 14) eingezeichnet.

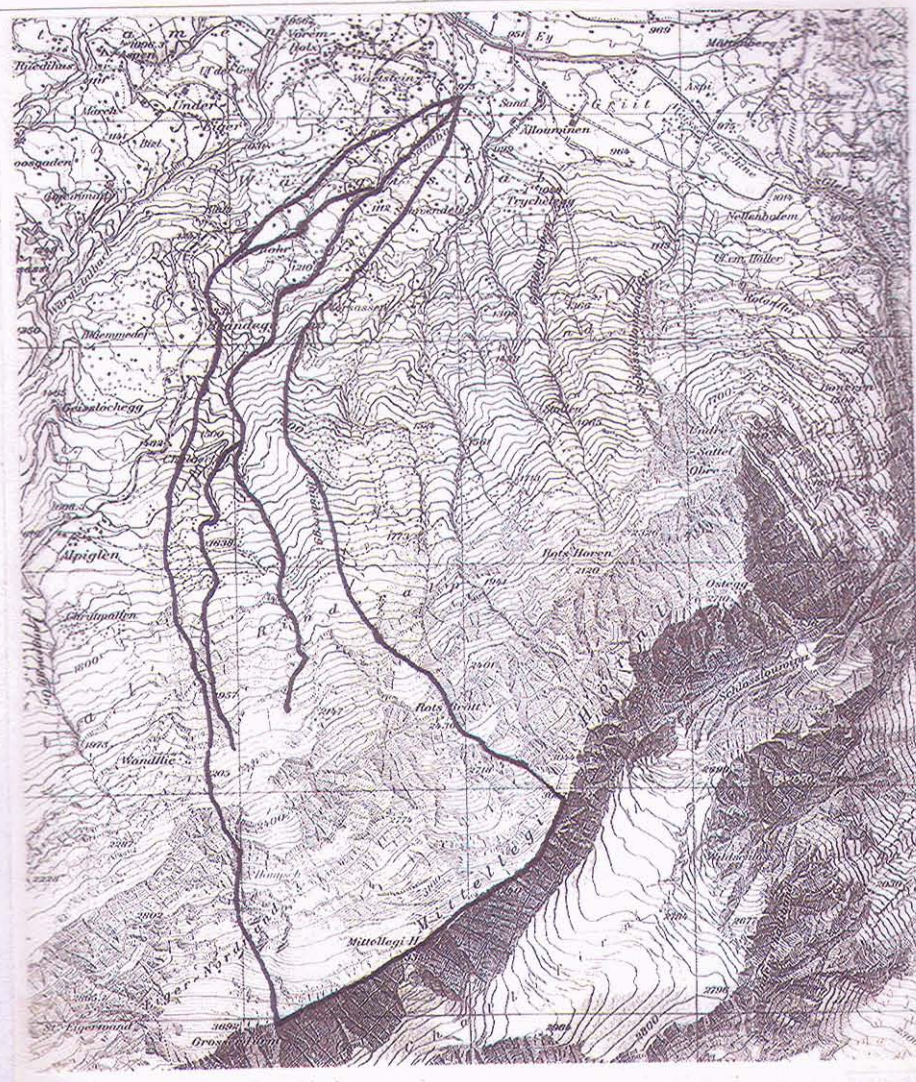


Fig. 14 Einzugsgebiet des Sandbachs bei Grindelwald (Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 6.12.1996)

Die Vorarbeiten umfassen:

A) Beschaffung von Unterlagen

Das verwendete Material entspricht demjenigen in Kapitel 3.2.1 in Teil I. Zusätzlich ist zu bemerken:

- Aufgrund eines speziellen Auftrages wurden im Sommer 1992 Luftbilder im Massstab von ca. 1:5000 bis 6000 aufgenommen, welche neben dem üblichen Material der Landestopographie ebenfalls zur Verfügung stehen.
- Als geologische Karte kann Blatt Nr. 13 des Geologischen Atlas der Schweiz, Grindelwald 1:25'000, beigezogen werden.
- Unterlagen zum Einzugsgebiet bestehen im "Projekt I/1992 für die Verbauung des Sandbachs" (Ing. Büro Bettschen und Blumer, Unterseen).

B) Studium und Interpretation von Dokumenten

Neben dem grösseren Ereignis von 1989 ist ein kleineres im Jahre 1981 dokumentiert (Geröll und Schlamm im Bereich des Zeltplatzes). Das Ereignis von 1989 hat ca. 2000 bis 2500 m³ Material auf dem Kegel abgelagert. Dasjenige aus dem Jahre 1981 dürfte dagegen lediglich mehrere hundert m³, vorwiegend Feinmaterial, akkumuliert haben.

Weitere bedeutende Ereignisse sind nicht bekannt, wie Umfragen bei Anwohnern ergeben haben.

Anhand der Dokumente können im Kegelbereich keinerlei Hinweise auf Murgänge gefunden werden. Eine definitive Abklärung erfolgt später im Gelände.

Wie bei andern Wildbächen ist die Verbauungsgeschichte auch im Sandbach eng mit seiner Ereignisgeschichte verknüpft. So sind nach 1989 im Bereich der Koten 1020 bis 1080 ca. fünf oder sechs massive Betonsperren erstellt worden. Diese sind auch auf den Luftbildern zu erkennen. Weitere Massnahmen sind anhand der Karte nicht ersichtlich.

C) Karten- und Luftbildinterpretation

Bezüglich des Verlagerungsprozesses kann noch keine definitive Entscheidung gefällt werden. Aufgrund der Dokumente sind keine Murgang-Aktivitäten auf dem Kegel des Sandbachs bekannt. Einzelne Stellen im Gerinne weisen jedoch ein recht hohes Gefälle von bis gegen 30% auf, so dass die Möglichkeit einer Sohlenverflüssigung mit der anschliessenden Entstehung eines Murganges im Gelände zu überprüfen ist.

Die Luftbildinterpretation ergibt folgendes:

Auf dem Luftbild könnten die Ablagerungen am Gerinne bei Kote 1220 auf einen Murgang hindeuten. Dies ist im Gelände zu überprüfen. Die Ablagerungen auf dem Kegel (terrestrische Fotos) lassen ausschliessen, dass ein Murgang beim letzten Ereignis bis auf den Kegel gelangte.

- Auffällige Geschiebeherde können nur im Bereich von Kote 1250 erkannt werden. Hier muss die Felderhebung klären, ob eine Rutschungsgefahr besteht und ob das Material das Gerinne erreichen könnte. Ausser dieser Stelle sind keine weiteren grösseren Geschiebeherde zu sehen.
- Im Einzugsgebiet können keine weiteren grössere Geschiebeherde gefunden werden. Das Gerinne weist zudem keine grösseren Einschnitte im Gelände auf, wie sie für stark geschiebeführende Wildbäche oft typisch sind. In den höheren Bereichen des Einzugsgebietes verläuft das Gerinne zudem des öftern auf Felssohle. Die mobilisierbare Feststoffmenge scheint deshalb nicht sehr gross zu sein. Diese Vermutung wird dadurch gestützt, dass nur wenige Hochwasserereignisse bekannt sind. Ein weiteres Indiz hierfür ist auch der bis zum Jahre 1989 geringe Verbauungsgrad des Sandbachs.

Zum Gerinne lässt sich ausserdem folgendes feststellen:

- Bestimmung von Ablagerungs- und Felsstrecken:
Bei Kote 1100 und 1220 wurde bereits 1989 ein beträchtlicher Teil des Materials abgelagert. Diese Stellen könnten auch in einem künftigen Ereignis eine bedeutende Rolle spielen, vorausgesetzt, ihre Funktion wird nicht eingeschränkt (im Gelände zu überprüfen). Bei Koten 1270 und 1350 sind Felsstrecken ersichtlich.
- Breite des Gerinnes:
Vergleichsweise schmal, vermutlich ca. zwei bis vier Meter breit.
- Relevanz von Seitengerinnen und Runsen:
Keine wesentlichen Runsen zu entdecken.
- Wasserbauliche Massnahmen (Art, Dimensionierung) und weitere Eingriffe wie Materialdeponien usw.:
Im Bereich von Kote 1050 sind ca. ein halbes Dutzend Querwerke neu erstellt worden.
- Das Längsprofil weist mehrere Abstufungen mit Retentionsmöglichkeiten auf. Es ist zu vermuten, dass ein grosser Teil der mobilisierten Feststoffe schon oberhalb des Kegels abgelagert wird.

D) Erste zusammenfassende Wildbachbeurteilung

Eine zusammenfassende Abschätzung des möglichen Verlagerungsprozesses sowie die erste Grobabschätzung der spezifischen Feststofffracht können nun anhand von Fig. 5 in Teil I vorgenommen werden.

Der Reihe nach gelten für den Sandbach dabei die folgenden Kriterien (Tab. 9):

Tab. 9 Erste Beurteilung der Wildbachkategorie und der möglichen Feststoffkubatur des Sandbachs anhand Fig. 5 in Teil I

Kriterium gemäss Fig. 5 in Teil I	Entscheidung	Bemerkungen
Entstehung eines Murganges möglich?	ja	notwendige Hangneigungen resp. Gerinnegefälle vorhanden
Durchschnittsgefälle des Hauptgerinnes über 20%?	ja	
Gerinnestrecken mit Gefälle deutlich unter 20% vorhanden?	ja	im unteren Gerinnebereich
Voraussichtlicher Wildbachtyp bezüglich des Verlagerungsprozesses festlegbar?	evtl. murfähig	—> weitere Abklärung im Gelände
Grosse Geschiebeherde im unmittelbaren Gerinnebereich vorhanden?	nein	
Längere Felsstrecken vorhanden?	ja	
Grössere Retentionsmöglichkeiten für Feststoffe vorhanden?	ja	
Voraussichtliche spezifische Feststofffracht?	mittel	

Der Sandbach ist gemäss der geologischen Karte den Helvetischen Alpen zuzuordnen. Nach Tabelle 2 in Teil I dürfte die spezifische Feststofffracht ca. 3500 - 7000 m³/km² betragen. Für das Einzugsgebiet des Sandbachs ergäbe dies eine Fracht von ca. 9000 - 18000 m³.

Nach den bisherigen Ermittlungen ist der Sandbach als **eventuell murfähiger** Wildbach einzustufen. Weitere Abklärungen haben im Gelände zu erfolgen.

E) Massgebende Hochwasserspitze

Die in der Folge zu erhebenden Parameter sind Bestandteil der Hochwasserberechnungen. Das Vorgehen wird in Fig. 15 dargestellt.

Beitragende Fläche

Die errechnete Beitragende Fläche im Sandbach beträgt 0.9 km². Dieser Wert liegt gegenüber einer Kartierung (ca. 1.3 km²) tiefer, was sich im Resultat niederschlägt (kleinerer Hochwasserwert: 7.6 m³/s anstatt 10.5 m³/s). Es wird mit dem kartierten Wert weitergerechnet.

Erforderliches Benetzungsvolumen

Das erforderliche Benetzungsvolumen wird anhand von Gebietskennwerten ermittelt. Geologische, pedologische und Vegetationsmerkmale fließen in die Abschätzung ein. Für eine detailliertere Betrachtungsweise ist eine Zusammenfassung von Geologie und Vegetationsmerkmalen hilfreich.

a) Geologie

Das ganze Einzugsgebiet wird dem Helvetischen Bereich (Autochthon/Parautochthon und Axen-Decke) zugeordnet. Eine detailliertere Betrachtung unterscheidet drei geologisch-tektonisch relevante Zonen:

- Der südlichste Teil des Einzugsgebietes baut sich aus autochthonen und parautochthonen Sedimenten des Aarmassivs auf. Malm- und Kreidekalke bilden eine steile und erosionsresistente 1000-1700 m hohe Masse (Eigernordwand-Mittellegigrat). In diesem Bereich sind keine wesentlichen wildbachrelevanten Prozesse zu erwarten (Steinschlag und Felssturz erfolgen weitgehend unabhängig vom Wildbachgeschehen).
- Die nördlich anschliessende Zone ist mit der südlichen verfaltet und verschuppt und besteht aus tertiären Kalken, Sandsteinen und Schiefern. Sie geht nach Norden über in ein Band aus tertiären, schlecht bekannten Flyschgesteinen (Schiefer und Sandsteine). Die nördliche Begrenzung dieser Zone fällt - etwas verallgemeinert - mit dem Trasse der Wengernalpbahn zusammen.
- Nördlich schliessen die mächtigen Dogger-Sandstein- und Schiefer-Massen an, welche die Männlichen-Faulhorn-Gruppe aufbauen und heute zur Axen-Decke gerechnet werden.

b) Vegetation

Das Einzugsgebiet ist ungefähr zur Hälfte bewaldet. Im unteren Bereich finden sich vor allem Wiesen, oberhalb von ca. 1500 m Alpweiden.

c) Ermittlung der Bodenkennwerte

Die Bodenkennwerte werden nun anhand der Bodeneignungskarte der Schweiz (EJPD 1980) erhoben. Massstabsbedingt sind die Informationen zu den Bodenverhältnissen nicht sehr detailliert. Gemäss Tab. 2 in Teil I genügt jedoch die Ermittlung der jeweiligen Bodenklasse. Das Einzugsgebiet des Sandbachs ist der Klasse 'Alpine Berg-Kalklandschaft mit wenig tiefgründigen Böden', Kategorie C, zuzuordnen.

Massgebende Regendauer und -intensität

Es werden die Starkniederschlagskarten des Hydrologischen Atlas der Schweiz verwendet.

1. Zuordnung der Extremalverteilung zum Einzugsgebiet.

—> 1. Extremalverteilung

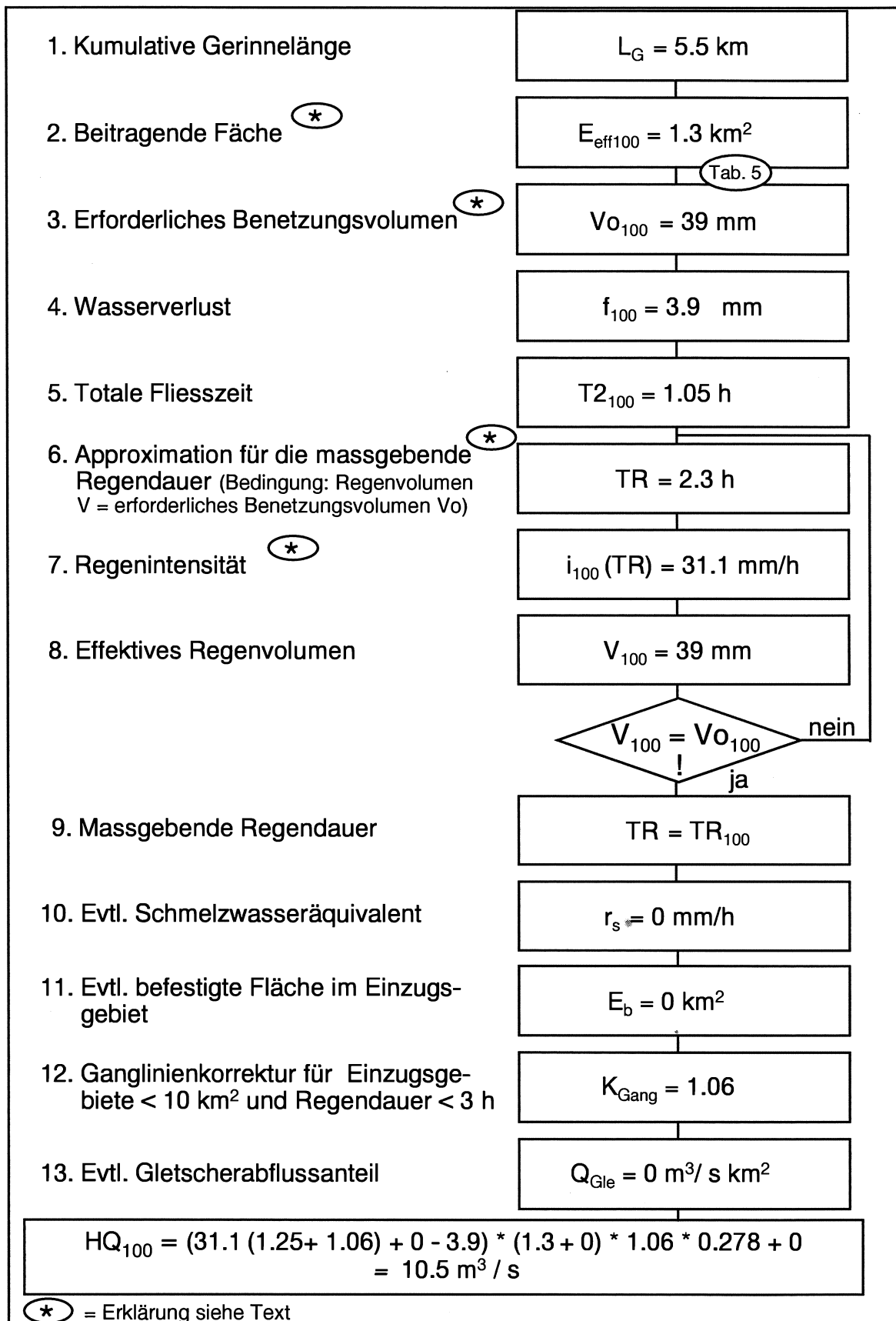


Fig. 15 Beispiel zur Berechnung eines 100jährigen Hochwassers für den Sandbach, Grindelwald

2. Aus den vier Starkniederschlagskarten erfolgt die Bestimmung der folgenden Werte:

– 1stündiger 100jähriger Niederschlag:	→	60 mm
– 24stündiger 100jähriger Niederschlag:	→	120 mm
– 1stündiger 2.33jähriger Niederschlag:	→	22 mm
– 24stündiger 2.33jähriger Niederschlag:	→	55 mm

3. Einsetzen der Werte gemäss der Legende in Kap. 3.2:

$$i_{t,T} = C \cdot t^b + 0.248 \left(A \cdot t^a - C \cdot t^b \right) (y(T) - 0.0577)$$

$i_{t,T}$ muss, wie in Fig. 15 dargestellt, mittels Iteration gefunden werden:

$$i_{t,T} = 2.3 \text{ h}$$

Durch Einsetzen der Werte erhält man:

$$i_{2.3,100} = 22 \cdot (2.3^{-0.742}) + 0.248 \left(60 \cdot (2.3^{-0.783}) - 22 \cdot (2.3^{-0.742}) \right) ((4.6) - 0.0577) = 31.2 \text{ mm/h}$$

Weitere Parameter

Für die restlichen Parameter (Berechnungsschritte 9 - 13 in Fig. 15) kann festgestellt werden:

- Schmelzwasseraequivalent: Im Prinzip keine Erhöhung notwendig. Die grössten Hochwasser entstehen vorzüglich im Sommer ohne signifikanten Einfluss von schmelzendem Schnee im hochwasserrelevanten Einzugsgebiet.
- Befestigte Fläche im Einzugsgebiet: Im Sandbach vernachlässigbar.
- Ganglinienkorrektur: Die massgebende Regendauer beträgt weniger als drei Stunden und das Einzugsgebiet ist kleiner als 10 km², jedoch grösser als 1 km². Daher wird eine Ganglinienkorrektur gemäss Tab. 6 durchgeführt.
- Gletscherabflussanteil: Das Einzugsgebiet weist keine Gletscher auf.

Hochwasserberechnung

Durch Einsetzen der errechneten Parameter in die Hochwasserformel erhält man eine Hochwasserspitze von rund 10 m³/s (Fig. 15). Dies ergibt einen spezifischen Abfluss von etwa 4 m³/s km².

5.1.2 Feldaufnahmen

A) Abschätzung der Murfähigkeit im Gelände

Zuerst wird der Kegelbereich untersucht. Auf dem Damm, welcher die Trennlinie zwischen Zeltplatz und Sandbach bildet, kann der Kegel gut überblickt werden. Folgendes ist festzustellen (vgl. Abb. 17 und 18):

Konkave Form des Kegels, flach, weitgehend strukturloses Gelände, keine sichtbaren Murgangspuren. Hieraus ist zu schliessen, dass es sich hier um einen Schwemmkegel handelt, auf welchem sich bisher keine Murgänge abgelagert haben. Dies wird auch anhand von Fotos des Ereignisses von 1989 bestätigt (Abb. 18). Etwaige anthropogene Überprägungen des Geländes (Landnutzung) wären in die Überlegungen miteinzubeziehen. Dafür gibt es hier aber keine entsprechenden Informationen. Im Gerinnebereich sind ebenfalls keine Hinweise auf Murgänge zu sehen: die kleinen terrassierten Ablagerungen weisen vielmehr auf geschiebeführende Hochwasser hin (Abb. 19).



Abb. 17 Ansicht des Sandbach-Kegels



Abb. 18 Materialablagerung nach dem Ereignis von 1989 auf dem Kegel des Sandbachs. Das Material wurde verschwemmt und in Richtung Kegelperipherie sortiert (abnehmende Korngrößen im Bildhintergrund).

Die Erhebungen auf dem Kegel haben somit keine Hinweise auf Murgänge ergeben. Der Bach wäre deshalb anhand der bisherigen Merkmale als nicht murfähig einzustufen. Da jedoch aufgrund der Luftbilddauswertung weitere diesbezügliche Abklärungen notwendig sind, wird empfohlen, die Möglichkeit beider Prozesse in Betracht zu ziehen.



Abb. 19 Kleine fluviale Terrassen im Gerinne, Kegel Sandbach
(Aufnahme vom neuerbauten Damm aus)

B) Aufnahmen entlang des Gerinnes

Beim Aufstieg entlang des Baches wird, gemäss Kapitel 4.8, Seite 37 in Teil I, folgendes durchgeführt:

- Weitere Abklärung der Murfähigkeit
- Abschätzung des Feststoffpotentials
- Abschätzung des Ablagerungspotentials
- Aufnahme der Parameter für die Berechnung der Transportkapazität

Der Einstieg erfolgt möglichst bei der Untergrenze des ersten Gerinneabschnittes. Die Gerinneabschnitte sind im folgenden alphabetisch in aufsteigender Reihenfolge geordnet. In Tab. 11 finden sich neben der Angabe über die Lage der Querprofile auch die entsprechenden Werte aus den Feldaufnahmen.

Gerinneabschnitt a, Kote 975 - 1005 (Abb. 20)

Neben Breite und Gefälle des Gerinnes sind zu erfassen und in die Befunde der entsprechenden Aufnahmeformulare einzutragen:

- Sohlenbeschaffenheit (Lockermaterial, Korngrössen)
- Spuren früherer Ereignisse (Uferanrisse, Nachböschungsvorgänge usw.)
- Hinweise auf die voraussichtliche Verlagerungsart.

Die Itramenstrasse liegt ungefähr an der Schnittstelle Kegel (Ablagerungsfläche des Sandbachs) und Einzugsgebiet. Der unterste Gerinneabschnitt beginnt hier und endet unterhalb des ersten Querwerkes der ca. 300 m weiter oben sichtbaren Betonsperrentreppe. Im Abschnitt sind noch deutliche Spuren des Ereignisses von 1989 zu sehen, auch wenn einzelne Nachböschungsvorgänge vermutlich zu einem späteren Zeitpunkt erfolgten. Das Gefälle liegt im Bereich des kritischen Wertes für Entstehung eines Murganges (ca. 28%). Dies ist aber aufgrund der relativ grobkörnigen Abpflasterung der Sohle als eher unwahrscheinlich einzustufen. Zudem würde die Entstehung eines Murganges an dieser Stelle des Gerinnes, wenige Meter oberhalb des Kegels, keine grossen Auswirkungen haben.

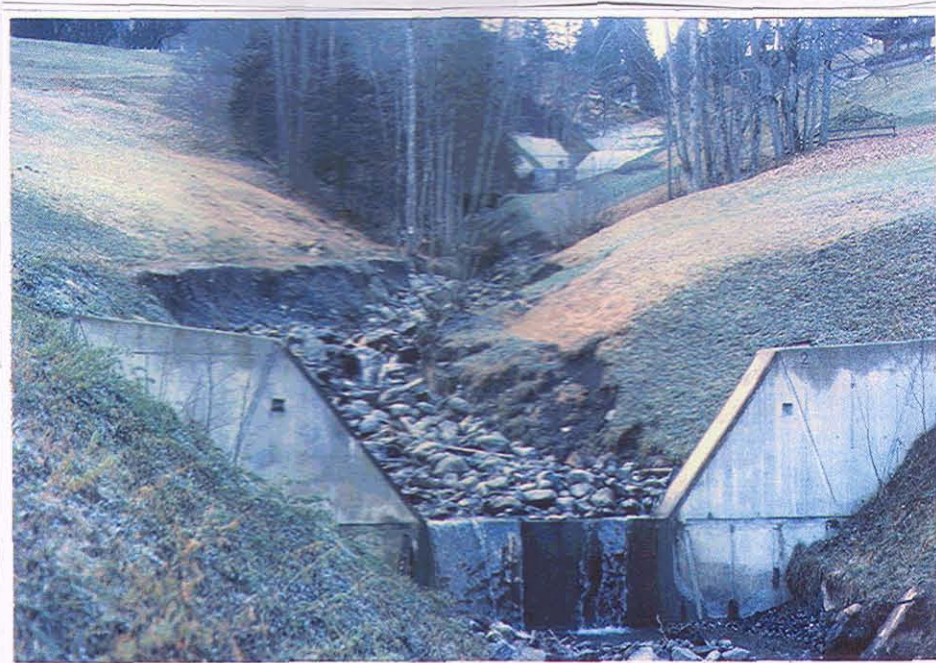


Abb. 20 Gerinneabschnitt a

Aufnahme von 1 bis 3 Querprofilen an geeigneter Stelle (z. B. oberhalb des untersten Querwerkes) und Erhebung der massgebenden Korngrössen d_{90} , d_{50} , d_{30} . Wenn möglich ist eine detaillierte Korngrössenanalyse gemäss Beschreibung in Teil I, Kap. 4.5.1, durchzuführen.

Begehung des Gerinnes bachaufwärts und Erfassung der relevanten Feststoffherde. Schätzung des Feststoffpotentials.

Für die Ermittlung des Feststoffpotentials im Gerinneabschnitt wird die sohlenstabilisierende Wirkung der Betonsperre ca. 50 Meter oberhalb des Durchlasses berücksichtigt. Das Querwerk ist relativ neu und gut erhalten. Bei einem grösseren Ereignis dürfte die Wahrscheinlichkeit gering sein, dass es zerstört wird. Für diese Strecke wird der Reduktionsfaktor k_{S0} (vgl. Teil I, S. 30/31) mit 0.8 festgelegt (vgl. Tab. 11).

Gerinneabschnitt b, Kote 1005 - 1050 (Abb. 21)

Dieser Abschnitt wurde nach dem Ereignis von 1989 verbaut. In bezug auf die Feststoffverlagerung stellen sich hier folgende Fragen:

- Stabilität der Querwerke bei Hochwassern bzw. Murgängen. Die Querwerke sind neu und in guter Verfassung, so dass kaum mit Sperrenbruch zu rechnen ist. Hingegen könnte das Wasser die Flügel seitlich umgehen.

- Auswirkung der Querwerke auf
 - Verlagerungsprozess (in bezug auf die Entstehung und als Transitstrecke). Im Bereich der Sperren ist die Entstehung eines Murganges wegen des reduzierten Sohlengefälles und der Absturzhöhen nicht zu erwarten. Bezüglich der Funktion als Transitstrecke zeigt die Erfahrung jedoch, dass grössere Sprunghöhen für grosse Murgänge kein Hindernis darstellen. Ein Verlust an Material dürfte jedoch eintreten. Die Ablagerungskapazität zwischen den einzelnen Sperren beträgt ca. 200 m³, so dass insgesamt ca. 1200 m³ zurückgehalten werden können. Die einzelnen Murgangswellen müssten somit eine grössere Masse aufweisen, um über diese Strecke Richtung Kegel weiter zu fließen. Aufgrund der bereits aus Karte und Luftbild erfolgten Abschätzung erscheint dieses Szenarium jedoch unwahrscheinlich (grössere Flachstrecken oben, keine grossen Geschiebeherde).



Abb. 21 Gerinneabschnitt b

- Sohlenerosion. Aufgrund des Verlandungsgefälles von ca. 11% und des zwischen den einzelnen Querwerken erweiterten Gerinnes ist nicht mit einer grösseren Materialaufnahme zu rechnen.
- Böschungserosion inkl. Nachböschungsvorgänge. Diese können aufgrund des Kolkschutzes nur in beschränkter Masse auftreten.
- Transportkapazität. Diese ist zumindest zu Beginn des Ereignisses gegenüber den früheren Verhältnissen stark reduziert. Mit zunehmender Ereignisdauer kann sich diese infolge der Zunahme des Verlandungsgefälles zwischen den einzelnen Querwerken jedoch erhöhen.
- Ablagerungskapazität. Sie beträgt, wie oben erwähnt, insgesamt ca. 1200 m³.

In diesem Abschnitt ist mit Materialablagerungen im erwähnten Umfang zu rechnen. Bei veränderten Bedingungen hingegen (z.B. schlechter Zustand der Bauwerke) wäre diese Schlüsselstelle neu zu beurteilen.

Gerinneabschnitt c, Kote 1050 - 1100 (Abb. 22)

Die Sohle ist u. a. mit kantigem, kristallinem Moränenmaterial aus der Böschung gepflastert. Aufgrund des Gefälles (im Mittel ca. 20%) ist höchstens mit der Entstehung eines kleinen Murganges

aus einer Verkläusung (Durchbruch von Material) zu rechnen. In diesem Fall spielt die von oben bis hierher transportierte Materialmenge eine Rolle. Solche Murgänge werden sich jedoch nicht bis zum Kegel fortsetzen können (vgl. Abschnitt b), da die dafür notwendige Masse fehlen dürfte. Der Anteil des Materials aus Böschungsprozessen ist in diesem Abschnitt höher als in den unteren Bereichen. Bei der Abschnittsuntergrenze kann sich ca. 200 m³ Material ablagern.



Abb. 22 Gerinneabschnitt c

Gerinneabschnitt d, Kote 1100 - 1105 (Abb. 23)

Die kanalisierte Strecke wird durch zwei Durchlässe begrenzt. Das erodierbare Material kann vernachlässigt werden. Die Gefahr einer Verstopfung der Durchlässe ist gross. Die Verstopfung des unteren Durchlasses bewirkt eine Auffüllung des Gerinnes bei der Säge, was (wie bereits während des Ereignisses 1989) zu Materialakkumulationen führen kann. Unterhalb des Durchlasses (d. h. im Gerinneabschnitt c) dürfte deshalb in verstärkter Masse Erosion einsetzen.

Gerinneabschnitt e, Kote 1105 - 1125 (Abb. 24)

1989 wurde hier der Bergweg grösstenteils weggespült. Das Gefälle weist einen geringen Wert auf, die Entstehungsgefahr für einen Murgang ist deshalb auch hier gering.

Gerinneabschnitt f, Kote 1125 - 1150 (Abb. 25)

Oberhalb des Wegübergangs sind nach 1989 beidseitig Dämme errichtet worden. Sie sollen Ablagerungen neben dem Gerinne verhindern. Durch die Ausschaltung dieser natürlichen Retentionsfläche und mit der teilweisen Verengung des Gerinnes werden im Vergleich zur Situation vorher günstigere Transportverhältnisse geschaffen. Dies könnte sich im Falle eines Murganges als negativ erweisen. Aufgrund der Gerinnegrösse und der Gefällsverhältnisse ist eine Fortsetzung in die unteren Gerinnebereiche jedoch wenig wahrscheinlich. Der Murgang hätte eine Masse von wenigen 100 m³.



Abb. 23 Gerinneabschnitt d



Abb. 24 Gerinneabschnitt e



Abb. 25 Gerinneabschnitt f

Gerinneabschnitt g, Kote 1150 - 1175 (Abb. 26)

Seit dem Ereignis 1989 wurde dieser Bereich stark erodiert. Die Böschungen haben sich um mehrere Meter zurückgebildet. Ihre Funktion während eines künftigen Grossereignisses ist jedoch stark von der Beschaffenheit der Sohle abhängig. Es ist anzunehmen, dass durch die stellenweise grobe Abpflasterung der Sohle die Eintiefung gebremst wird. Aufgrund des lokalen Gefälles könnte an dieser Stelle ein kleinerer Murgang entstehen. Dessen Reichweite dürfte jedoch nicht über den unteren Abschnitt hinausgehen (Massen- und Energieproblem). Ein grösserer Murgang aus einem weiter obengelegenen Gerinnebereich kann eine beträchtliche Feststoffmenge aus diesem Abschnitt erodieren. Es ist aber auch hier fraglich, ob grössere Materialmassen (d. h. über 1000 m³) Gerinneabschnitt f überhaupt passieren können.

Die Böschungserosion beträgt Fläche mal Mächtigkeit. Für die Bestimmung der Mächtigkeit kann anhand der bestehenden Anbrüche eine Abschätzung vorgenommen werden.

Gerinneabschnitt h, Kote 1175 - 1200 (Abb. 27)

Gerinneabschnitt mit einem mittleren Gefälle von 25%. Aufnahme von zwei Querprofilen.



Abb. 26 Gerinneabschnitt g



Abb. 27 Gerinneabschnitt h

Gerinneabschnitt i, Kote 1200 - 1220 (Abb. 28)

Vom Gefälle her eine Ablagerungsstrecke, wobei die Retentionsverhältnisse ebenfalls durch seitliche Dammbauten eingeschränkt worden sind. Infolge des geringen Gefälles ist die Transportkapazität nicht hoch (insgesamt 8000 m³).



Abb. 28 Gerinneabschnitt i

Gerinneabschnitt j, Kote 1220 - 1260 (Abb. 29)

In diesem Abschnitt sind zwei Punkte von Interesse:

- Feststoffrelevanz des unbewaldeten und befestigten Hangbereichs (Abb. 29). Dieser konnte bereits auf der Luftaufnahme deutlich erkannt werden. Nun stellt sich die Frage nach dem voraussichtlichen Prozess während des Ereignisses. Flachgründige Rutschungen sind in diesem Bereich am ehesten zu erwarten. Viel Material wird dabei jedoch kaum aktiviert. Falls überhaupt, dürfte überdies nur ein kleiner Teil der Feststoffe das Gerinne erreichen, wohl grösstenteils Feinmaterial. Dieses wird bei Hochwasser durch das Hauptgerinne weggeschwemmt. Bei erhöhtem Anteil Grobmaterial bestünde die Gefahr eines temporären Gerinneaufstaus, mit der Konsequenz eines Durchbruches. Der daraus entstandene Murgang würde jedoch aufgrund der Gefällsverhältnisse weiter unten keine längere Strecke zurücklegen können.
- Die Ablagerungen auf Kote ca. 1225 deuten auf den Stillstand eines früheren Murganges hin. 1989 war dies tatsächlich der Fall. Die Geländebeziehungen der näheren Umgebung (stark strukturierte Oberfläche) legen die Frage nahe, ob bereits früher Murgänge in diesem Bereich zum Stillstand gekommen sind. Es gibt anhand der Spuren im Gelände und am Gerinne keine Hinweise dafür, dass Murgänge weiter bachabwärts geflossen sind.

Für die weitere Vorgehensweise in den höher gelegenen Gerinneabschnitten mit deutlich über 20% Gefälle ist primär auf das Feststoffpotential zu achten:

- Das Gefälle ist für den Gültigkeitsbereich der verfügbaren Transportformeln zu hoch.
- Die Kubatur der transportierten Feststoffe liegt erfahrungsgemäss unter der Transportkapazität steiler Abschnitte.

- Das Material wird vollumfänglich den unteren Gerinneabschnitt erreichen. Dessen Transportkapazität bestimmt die Menge des transportierten Materials.

Gerinneabschnitt k, Kote 1260 - 1280 (Hintergrund in Abb. 29)

Dieser Abschnitt besteht vorwiegend aus Fels, in welchem lediglich Zwischendeponien ausgeräumt werden. Es kann aber Material aus dem Hang ins Gerinne gelangen. Dies geschieht jedoch unabhängig von den Vorgängen im Gerinne selbst. Flachgründige Rutschungen können einige hundert m³ Material in das Gerinne einbringen.

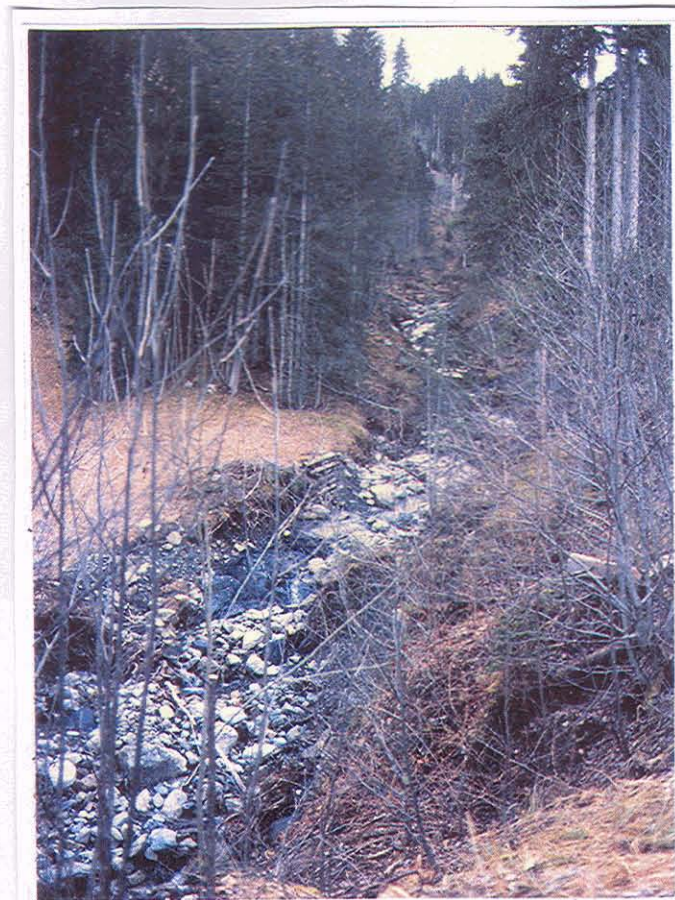


Abb. 29 Gerinneabschnitt j

Gerinneabschnitt l, Kote 1280 - 1360 (Abb. 30)

Auf der rechten Seite des unteren Gerinnebereichs (ca. bei Kote 1290) ist ein Grossteil des Hanges als Teil einer grösseren Sackungsmasse in Bewegung. Dies ist deutlich anhand von Schollen und an der Baumstellung ersichtlich. Die untersten Bereiche dieser Hangmasse liefern vermutlich oft Material in das Gerinne. Der Feststoffeintrag ist deshalb einerseits abhängig von Gerinneprozessen (Unterschneidung mit möglichen Nachböschungsvorgängen), andererseits von den Hangprozessen selbst. Die voraussichtliche Kubatur dürfte sich primär in der Grössenordnung der Nachböschungsvorgänge bewegen.

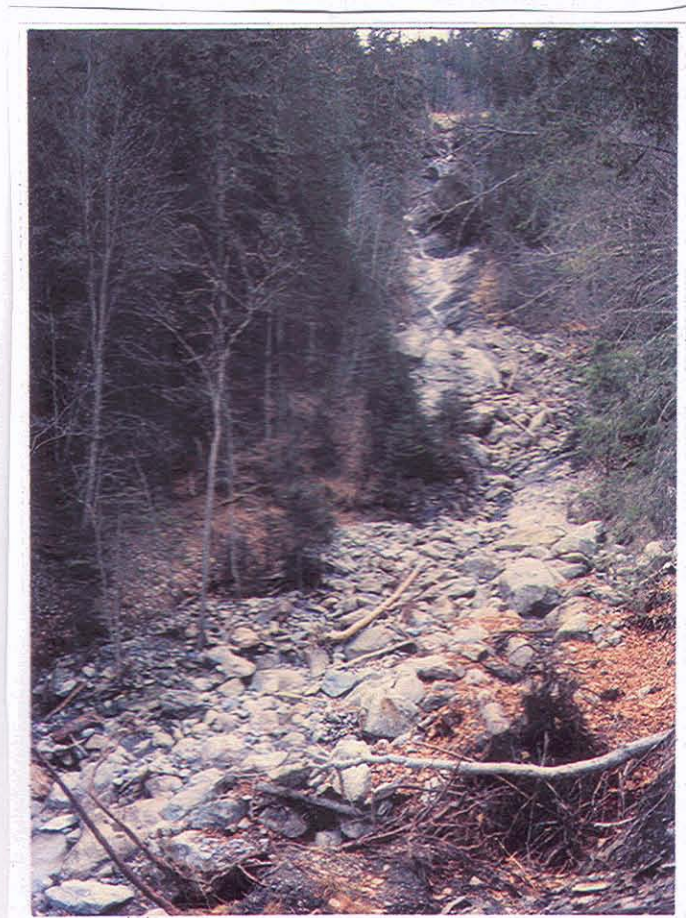


Abb. 30 Gerinneabschnitt I

Gerinneabschnitt m, Kote 1360 - 1430 (Abb. 31)

Felsgerinne ohne grosses Feststoffpotential. Wenig Material wird aus den einzelnen kleinen Treppeinstufen aktiviert.

Gerinneabschnitte n bis t

Die weiter oben liegenden Gerinneabschnitte werden sinngemäss erhoben. Retentionsräume sind auf Koten 1490 (Gerinneabschnitt o), im Gerinneabschnitt q und auf Kote 1600 (Gerinneabschnitt s), vorhanden. In diesen Bereichen sind keine deutlichen Zeichen früherer Murgänge zu erkennen. Grobblockiges und kantengerundetes Material ist zwar im Gerinne vorhanden. Diese Zurundung dürfte auch durch Schurfvorgänge bei einzelnen Hochwassern entstanden sein.

Erhebung der massgebenden Geschiebekorngrössen d_{90} , d_{50} , d_{30}

Für das sehr inhomogene Sohlenmaterial des Sandbachs wird die Durchführung von Linienzahlanalysen an verschiedenen Stellen empfohlen. Diese Linienzahlanalysen können bei der Auswertung mit einer Fullerkurve kombiniert werden. Da der Bach an verschiedenen Stellen sehr eng ist, können die einzelnen Proben nicht nebeneinander, sondern müssen in Fliessrichtung versetzt gelegt werden. Die einzelnen Proben ergeben sehr unterschiedliche Werte für die massgebenden Geschiebekorn-

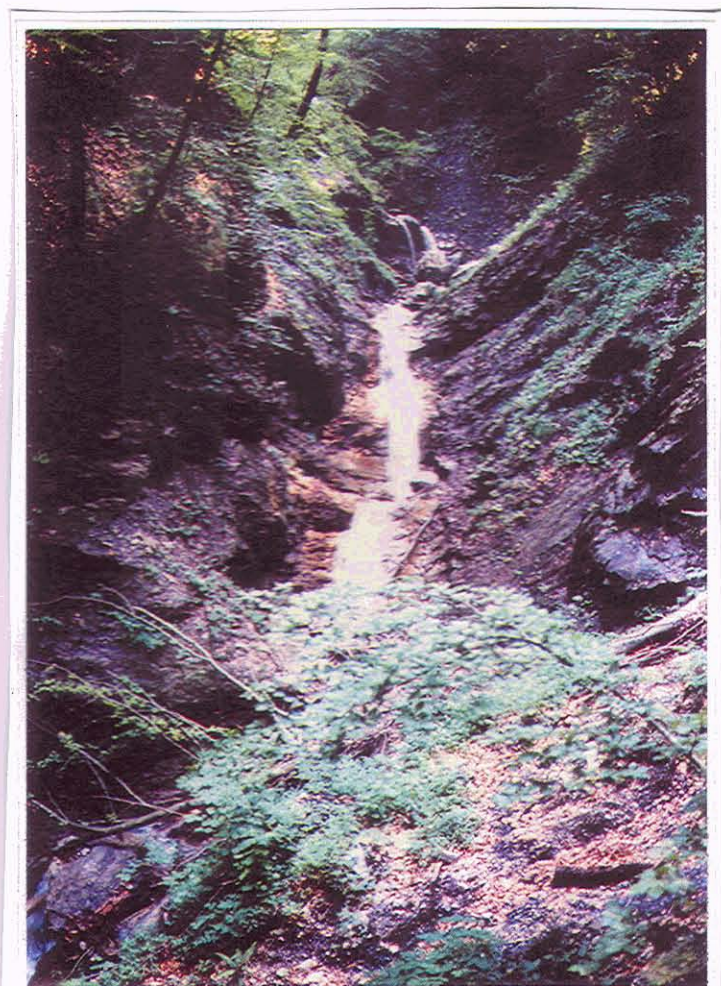


Abb. 31 Gerinneabschnitt m

größen d_{90} , d_{50} , d_{30} , was teilweise damit zusammenhängen kann, das im oberen Teil des Baches Murgänge vorkommen, das Material im unteren Bereich jedoch durch Geschiebetransport verlagert wird. Proben sollten an mindestens drei Standorten durchgeführt werden, welche vorzugsweise den Bereich zwischen Koten 1260 (Obergrenze des Gerinneabschnittes j) und 1050 (Untergrenze des Gerinneabschnittes c) abdecken.

Zusammenfassung

Die wesentliche Arbeit im Gelände ist hiermit abgeschlossen. Als Schlüsselstellen im Sandbach sind zu erwähnen:

- die Verbauungen in Gerinneabschnitt b
- die Stelle der Murablagerungen im Gerinneabschnitt j
- die Retentionsräume ('Geländeterrassen'), welche heute durch Dämme in ihrer ursprünglichen Funktion eingeschränkt sind
- die Durchlässe bei der Säge, wo Verstopfungsgefahr besteht.

Die vorgenommene Beurteilung ist lediglich eine Momentaufnahme. Nach einem grossen Hochwasser oder einem grösseren Eingriff am Gerinne (Verbauungen) wäre deshalb eine Neubeurteilung durchzuführen.

Die genannten Beobachtungen führen zum Schluss, dass der Sandbach insgesamt als nicht murfähig zu betrachten ist. Im oberen Einzugsgebiet können zwar Murgänge entstehen. Diese gelangen nach der vorliegenden Beurteilung jedoch nicht bis zum Kegel hinunter.

Somit gilt für den Sandbach das Verfahren für nicht murfähige Wildbäche.

5.1.3 Auswertungen

A) Analyse des Sohlenmaterials

Für d_{90} , d_{50} und d_{30} wurden 0.6 m, 0.05 m und 0.01 m (gerundet) als durchschnittliche Werte errechnet.

B) Berechnung der Feststoffbilanz für jedes Querprofil

a) Erstellung der Abflussganglinie für jedes Querprofil

Der Hochwasserabfluss am Kegelhals wurde bereits im Rahmen der Vorarbeiten nach Koella bestimmt. Nun ist neben der Abflussspitze für jedes Querprofil auch die Ganglinie zu bestimmen. Hierfür muss für die Lage jedes Querprofils folgendes bekannt sein: die für die Berechnungen nach Koella notwendigen Parameter, dazu Niederschlags- und Abflussvolumen. Einzugsgebietsfläche, Kumulative Gerinnelänge, Abflussbeiwert, errechnete Abflussspitze, Niederschlags- und Abflussvolumen und Gesamtzeitdauer der Abflussganglinie sind für jedes Querprofil in Tab. 10 zu finden.

Tab. 10 Berechnung der Abflussganglinie für jedes Querprofil (Zahlen gerundet)

Querprofil-Nr.	Kote [m ü. M.]	Einzugsgebietsfläche [km ²]	Kumulative Gerinnelänge [km]	Beitragende Fläche [km ²]	Abflussbeiwert [-]	HQ ₁₀₀ [m ³ /s]	Niederschlagsvolumen [m ³]	Abflussvolumen [m ³]	Zeitdauer d. Abflussganglinie [h]
1	980	2.6	5.5	1.31	0.50	10.5	187'000	94'000	5.0
2	990	2.6	5.5	1.26	0.48	10.1	186'000	90'000	5.0
3	1010	2.6	5.3	1.24	0.48	9.9	186'000	88'000	5.0
4	1020	2.5	5.3	1.20	0.48	9.6	178'000	86'000	4.9
5	1030	2.5	5.2	1.18	0.47	9.4	178'000	84'000	4.9
6	1050	2.4	5.2	1.15	0.48	9.2	170'000	82'000	4.9
7	1060	2.4	5.1	1.14	0.48	9.2	170'000	81'000	4.9
8	1075	2.4	5.1	1.12	0.47	9.0	170'000	79'000	4.9
9	1105	2.3	4.9	1.06	0.46	8.5	162'000	74'000	4.9
10	1110	2.3	4.9	1.03	0.45	8.3	162'000	73'000	4.9
11	1115	2.3	4.8	1.02	0.44	8.2	162'000	72'000	4.9
12	1118	2.3	4.8	1.00	0.43	8.0	161'000	70'000	4.8
13	1120	2.2	4.8	0.98	0.45	7.9	154'000	69'000	4.8
14	1130	2.2	4.7	0.96	0.44	7.7	154'000	67'000	4.8
15	1170	2.1	4.6	0.94	0.45	7.6	146'000	65'000	4.8
16	1180	2.1	4.5	0.92	0.44	7.5	146'000	64'000	4.8
17	1185	2.1	4.4	0.90	0.43	7.3	146'000	63'000	4.8
18	1190	2.1	4.4	0.85	0.41	6.9	145'000	59'000	4.8
19	1205	2.0	4.3	0.84	0.42	6.8	138'000	58'000	4.7
20	1210	2.0	4.3	0.82	0.41	6.6	138'000	56'000	4.7

b) Zuordnung von Feststoff- und Ablagerungspotential zu den einzelnen Querprofilen

Nachfolgend sind in Tabelle 11 Länge der Gerinneabschnitte, Feststoffherde und das jeweilige Feststoff- und Ablagerungspotential aufgelistet. Zusätzlich findet sich darin eine Feststoffbilanz pro Gerinneabschnitt.

Tab. 11 Kubaturen aus der Felderhebung

Bezeichnung des Geschieberdes	Länge des Gerinneabschnitts [m]	Korrekturfaktor für die Kubaturen [-]	Erosionshöhe [m]	Erosionsbreite [m]	Erosionsmächtigkeit [m]	Erosionsvolumen im Geschieberdes [m ³]	Erosionsvolumen im Gerinneabschnitt [m ³]	Ablagerungen im Gerinneabschnitt [m ³]	+/- Bilanz für jeden Gerinneabschnitt [m ³]
A	182	0.8	0.0	4.5	0.30	197	389	150	239
A1 l	182	0.5	3.0	0.0	0.50	137			
A1 r	182	0.5	2.0	0.0	0.30	55			
B	186	0.3	0.0	5.0	0.30	83	195	360	-165
B1 l	186	0.5	2.0	0.0	0.30	56			
B1 r	186	0.3	2.0	0.0	0.50	56			
C	186	0.5	0.0	5.0	0.30	139	306	105	201
C1 l	186	0.5	3.0	0.0	0.30	83			
C1 r	186	0.5	3.0	0.0	0.30	83			
D	61	0.3	0.0	2.5	0.30	14	14	15	-2
E	102	0.5	0.0	5.0	0.30	76	199	50	149
E1 l	102	0.5	3.0	0.0	0.30	46			
E1 r	102	0.5	3.0	0.0	0.50	76			
F	172	0.6	0.0	6.0	0.30	186	186	361	-175
G	103	0.6	0.0	7.0	0.50	216	442	0	442
G1 l	103	0.5	5.0	0.0	0.30	77			
G1 r	103	0.8	6.0	0.0	0.30	148			
H	103	0.5	0.0	8.0	0.50	206	330	124	206
H1 l	103	0.5	3.0	0.0	0.30	46			
H1 r	103	0.5	3.0	0.0	0.50	77			
I	122	0.6	0.0	2.5	0.30	55	55	106	-52
J	155	0.8	0.0	8.0	1.00	994	1105	0	1105
J1	155	0.6	4.0	0.0	0.30	112			
K	63	0.1	0.0	2.0	0.10	1	153	0	153
K1	63	1.0	8.0	0.0	0.30	152			
L	291	0.8	0.0	8.0	1.50	2796	3058	0	3058
L1	291	1.0	3.0	0.0	0.30	262			
M	193	0.3	0.0	3.0	0.10	17	17	0	17
N	187	0.8	0.0	8.0	1.50	1793	3268	0	3268
N1	187	1.0	4.0	0.0	0.30	224			
N1	150	0.5	25.0	0.0	1.00	1250			
O	123	1.0	0.0	8.0	0.50	490	490	981	-490
P	745	0.5	0.0	2.0	0.20	149	149	0	149
Q	255	0.8	0.0	4.0	0.30	245	321	0	321
Q1	255	0.5	2.0	0.0	0.30	76			
R	157	0.3	0.0	2.0	0.30	28	28	0	28
S	151	1.0	0.0	5.0	0.30	227	227	1200	-973
T	537	0.5	0.0	4.0	0.50	537	537	537	0

Legende:

A - T: Gerinneabschnitte mit Sohlenerosion

1: zusätzlich beidseitige Böschungserosion

l: linksseitig

r: rechtsseitig

In Tab. 12 wurden Feststoff- und Ablagerungspotential auf jedes der 20 Querprofile, gemäss ihrer Lage entlang des Baches, aufgeteilt.

c) Berechnung der Transportkapazität für jedes Querprofil

Für die Berechnung der Transportkapazität wurde das Vorgehen nach Rickenmann gewählt. Der kritische Abfluss wurde nach den Verfahren zur Berechnung der Zerstörung einer Blockrampe ermittelt (vgl. S. 42-44, Teil I). Die Ergebnisse sind für jedes Querprofil in Tab. 12 zu finden.

Tab. 12 Feststoffverlagerung im Sandbach, Grindelwald

Querprofil Nr.	Erosions- potential geschätzt (m³)	Aufsummiertes Potential berechnet (m³)	Ablagerungs- potential geschätzt (m³)	Ablagerung berechnet (m³)	Transport- kapazität berechnet (m³)	Feststoff- fracht berechnet (m³)	Q max berechnet (m³/s)
20	9276	9276	500	386	8890	8890	6.6
19	605	9881	3000	3000	9198	6495	6.8
18	400	10281	1000	0	48229	6895	6.9
17	400	10681	300	300	39612	6995	7.3
16	387	11068	200	0	40754	7382	7.5
15	1196	12264	300	0	53445	8578	7.6
14	200	12464	1000	1000	22488	7778	7.7
13	212	12676	1000	1000	12976	6990	7.9
12	100	12776	100	100	11038	6990	8.0
11	100	12876	100	0	11316	7090	8.2
10	125	13001	0	0	30835	7215	8.3
9	14	13015	1000	0	31622	7229	8.5
8	500	13515	500	500	12536	7229	9.0
7	300	13815	200	0	66266	7529	9.2
6	146	13961	500	500	15415	7175	9.2
5	80	14041	1500	0	68554	7255	9.4
4	80	14121	1000	0	70083	7335	9.6
3	90	14211	500	500	5637	6925	9.9
2	300	14511	0	0	23113	7225	10.1
1	384	14895	0	0	77032	7609	10.5

d) Überprüfung des Ergebnisses

Die errechnete Feststoffkubatur am Kegelhalb ist nun mittels Fig. 14 und Tab. 2 in Teil I zu überprüfen. Die Kubatur ist durch die Anzahl Quadratkilometer des Einzugsgebietes zu teilen (= spezifische Feststofffracht) und diese anschliessend, nach geologischer Zugehörigkeit, mit den Werten in Fig. 14 und Tab. 2 in Teil I zu vergleichen. Da es sich im vorliegenden Fall um einen nicht murfähigen Wildbach handelt, sollte die spezifische Feststofffracht etwa einem mittleren Wert in Fig. 14 und Tab. 2 in Teil I entsprechen.

e) Durchführung von Sensitivitätsanalysen

Durch Veränderung einzelner Parameter wie Sohlenmaterial, Niederschlag, Feststoffpotential, usw. sind nun Sensitivitätsanalysen durchzuführen (am Beispiel nicht weiter ausgeführt).

f) Interpretation der Ergebnisse

Zur Interpretation der Ergebnisse können Graphiken erstellt werden (Fig. 16).

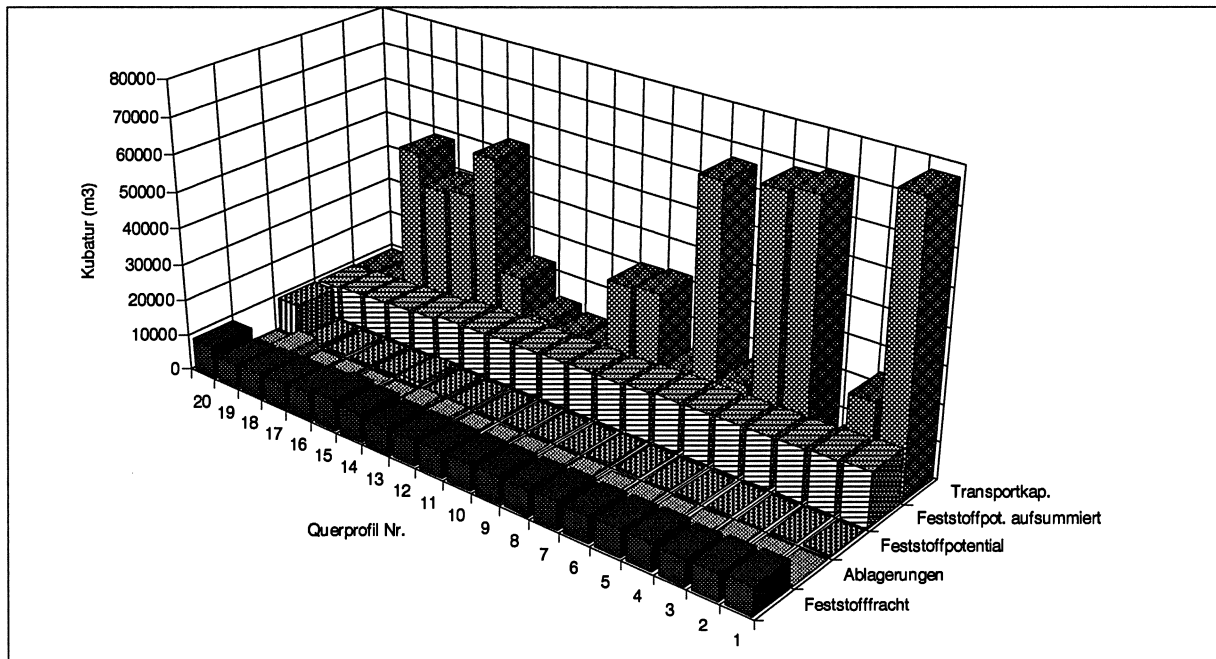


Fig. 16 Verlauf des Referenzereignisses im Sandbach, Grindelwald

5.2 Müllbach, Hergiswil

5.2.1 Vorarbeiten

Das Einzugsgebiet ist auf der Karte (Fig. 17) eingezeichnet und umfasst ca. 2.6 km² Einzugsgebietsfläche.

A) Beschaffung von Unterlagen

Das zu verwendende Material umfasst folgendes:

- Luftbilder der Landestopographie aus dem Jahre 1993
- Hydrologische Karte des Kantons Nidwalden 1:25'000 (Blatt Nord), 1973
- Unterlagen zu Verbauungsprojekten und zur Hochwassergeschichte sind durch das Ing. Büro Schubiger, Hergiswil erstellt worden.

B) Studium von Dokumenten

Im Technischen Bericht des Bauprojektes 1986, S. 4, sind einige Ereignisse erwähnt. Dabei sind die Jahre 1880, 1933 sowie 1977, 1978 und 1979 speziell hervorzuheben. 1979 sollen im Raum Unterstalden "mehrere Tausend m³" Geschiebe aufgefangen und zurückgehalten worden sein.

Im Technischen Bericht sind keine Angaben über den Verlagerungsprozess zu finden.

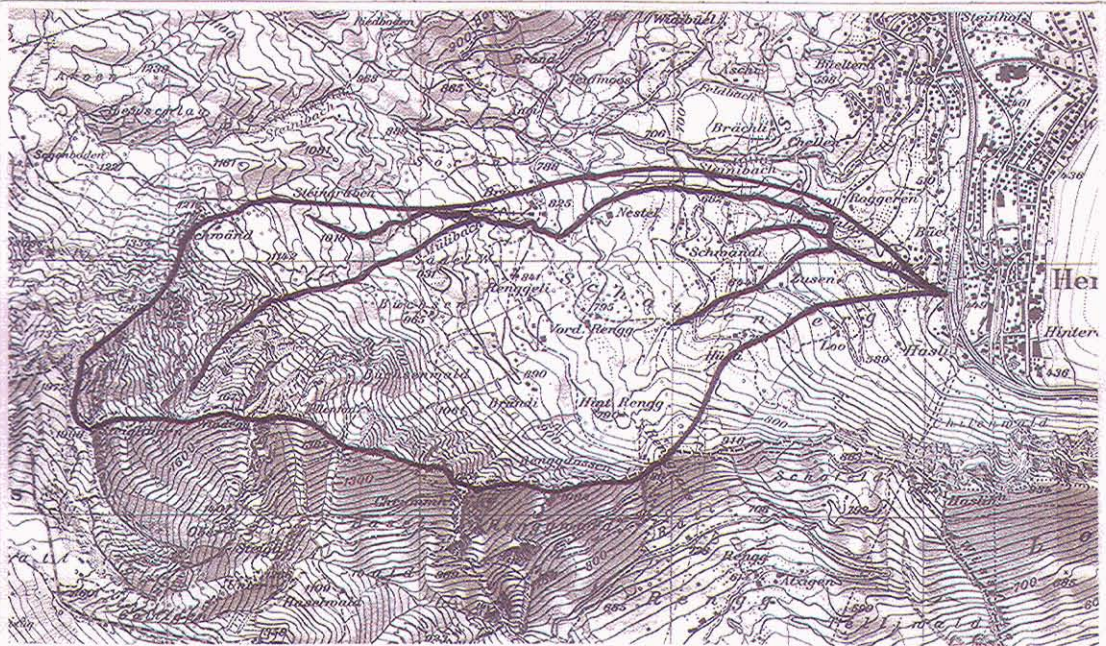


Fig. 17 Einzugsgebiet des Mülbachs bei Hergiswil (Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie vom 6.12.1996)

Angaben zur Verbauungsgeschichte befinden sich im Technischen Bericht des Bauprojekts 1986, Seite 5. Die ersten Verbauungen entstanden im Dorfbereich um die Jahrhundertwende, die Wildbachschale wurde 1932 gepflästert. Ab ca. 1928 wurden mit Hilfe von Bundesgeldern weitere Verbauungen (Querwerke, Leitwerke) errichtet. Im Jahre 1971 wurden die Sperren 8 bis 15 im Gebiet Unterstalden erstellt.

C) Karten- und Luftbildinterpretation

Die Luftbildbetrachtung ergibt folgendes:

- Geschiebeherde
Das Gerinne weist keine grösseren Einschnitte im Gelände auf. Auffällige Geschiebeherde können nur im obersten Einzugsbereich am Ostabhang des Pilatus erkannt werden. Hier muss die Felderhebung klären, inwieweit diese relevant sind, d.h. diese aus Lockermaterial bestehen. Ansonsten sind keine weiteren grösseren Geschiebeherde ersichtlich.
- Bestimmung von Ablagerungs- und Felsstrecken
Eine eindeutige Zuordnung ist aufgrund des Luftbildes nicht möglich.
- Breite des Gerinnes
Vergleichsweise schmal, vermutlich um die zwei bis vier Meter breit.
- Relevanz von Seitengerinnen und Runsen
Es gibt mehrere Runsen und Seitengerinne, z. B. südlich aus dem Bereich Rengg/Hüsli (vgl. Karte), nördlich aus dem Bereich östlich Gschwänd/Pt. 1018 (vgl. Karte).
- Wasserbauliche Massnahmen (Menge und Dimension) und weitere Eingriffe wie Materialdeponien usw.
Das Gerinne enthält verschiedene Querwerke, Leitwerke und Sperren.

- Das Längsprofil weist verschiedene Abflachungen auf. Hier kann allenfalls Material zurückgehalten werden. Dies ist bei der Felderhebung zu verifizieren.

Anhand von Karte und Luftbild sind keine eindeutigen Hinweise zu erkennen. Das Gefälle ist steil genug für einen Murgang. Die Murfähigkeit ist deshalb im Gelände zu überprüfen.

D) Erste zusammenfassende Wildbachbeurteilung

Anhand von Fig. 5 in Teil I kann deshalb erst eine Grobabschätzung der voraussichtlichen Feststofffracht vorgenommen werden.

Der Reihe nach gelten für den Mülibach die folgenden Kriterien nach Fig. 5 in Teil I (siehe Tab. 13).

Tab. 13 Erste Beurteilung der Wildbachkategorie und der möglichen Feststoffkubatur des Mülibachs

Kriterium gemäss Fig. 5 in Teil I	Entscheidung	Bemerkungen
Entstehung eines Murganges möglich?	ja	notwendige Hangneigungen resp. Gerinnegefälle vorhanden
Durchschnittsgefälle des Hauptgerinnes über 20%?	ja	
Gerinnestrecken mit Gefälle deutlich unter 20% vorhanden?	ja	
Wildbachtyp bezüglich des Verlagerungsprozesses festlegbar?	eventuell murfähig	---> weitere Abklärung im Gelände
Grosse Geschiebeherde im unmittelbaren Gerinnebereich vorhanden ?	nein	
Längere Felsstrecken vorhanden?	nein	
Grössere Retentionsmöglichkeiten für Feststoffe vorhanden?	nein	
Voraussichtliche spezifische Feststofffracht?	gross	

Der Mülibach ist gemäss der geologischen Karte und nach Tabelle 2 in Teil I primär der Kategorie Flysch zuzuordnen. Die spezifische Feststofffracht dürfte ca. 10'000 m³/km² betragen. Für das Einzugsgebiet des Mülibachs ergäbe dies eine Kubatur von ca. 26'000 m³.

Nach den bisherigen Ermittlungen ist der Mülibach als eventuell murfähiger Wildbach einzustufen. Weitere Abklärungen haben im Gelände zu erfolgen.

E) Massgebende Hochwasserspitze

Es wird wiederum das Vorgehen nach Koella gewählt (Fig. 18).

Beitragende Fläche

Die errechnete Beitragende Fläche im Mülibach beträgt 1.1 km².

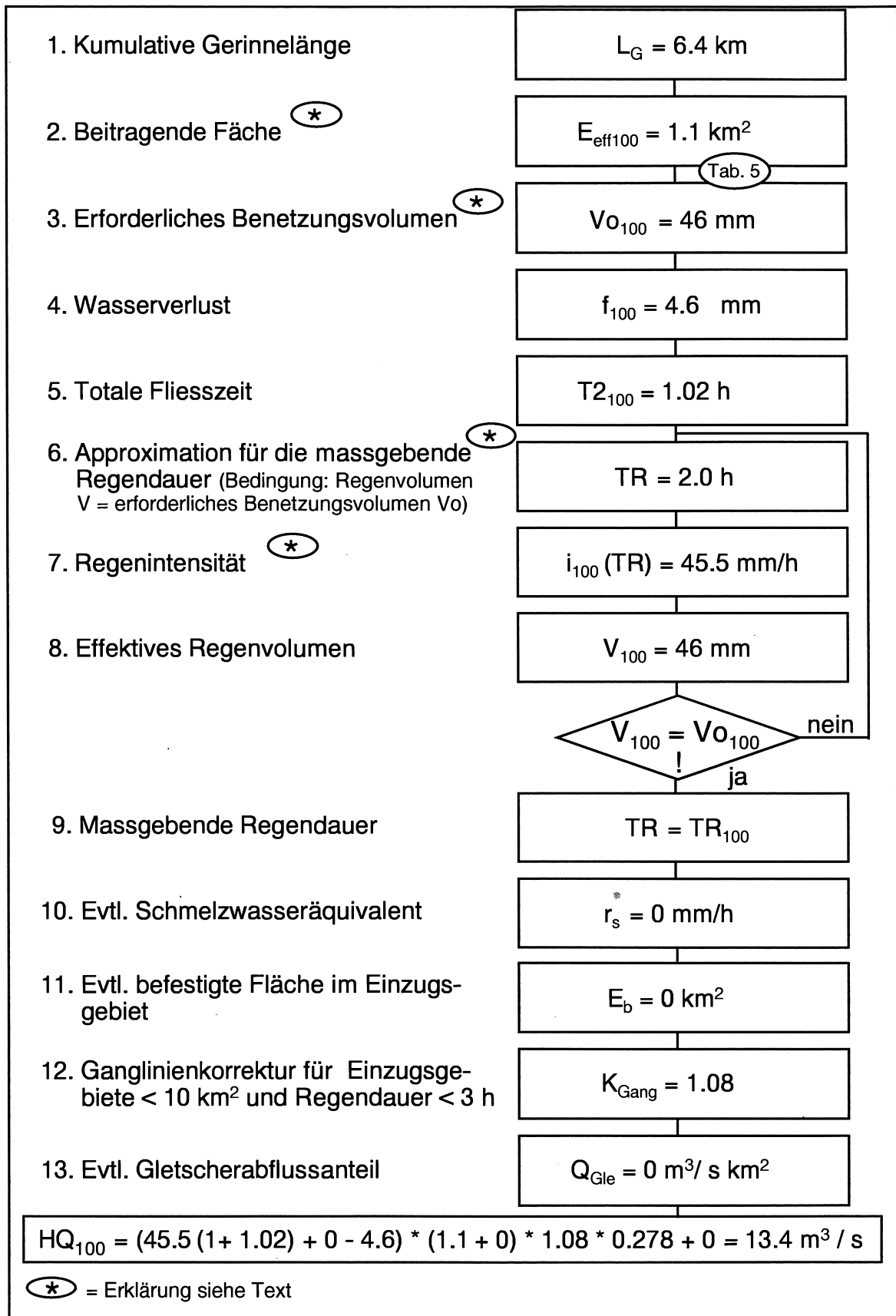


Fig. 18 Beispiel zur Berechnung eines 100jährigen Hochwassers für den Mülibach, Hergiswil

Erforderliches Benetzungsvolumen

Für den Mülibach lässt sich folgendes zusammenfassen:

a) Geologie

Der Mülibach durchläuft von der Nordostflanke des Pilatus bis zum Vierwaldstättersee zwei geologische Zonen. Der oberste Bereich des Einzugsgebietes, die Felswände des Pilatus, bestehen aus Kalken, Mergeln und Sandsteinen der Helvetischen Wildhorn-Decke. Der grösste Teil des Einzugsgebietes ist dem Subalpinen Flysch zuzuordnen, wobei die grauen Mergel nur im benachbarten Steinibach aufgeschlossen sind. Das Anstehende ist weitgehend von einer stellenweise verrutschten und versackten Lockermaterialmasse überdeckt (siltig-toniger Hangschutt und Moräne).

b) Vegetation

Die Oberflächenbedeckung des Einzugsgebietes besteht zu 13% aus verschiedener Feldvegetation, zu 39% aus Wald und zu 48% aus Wies- und Weidland.

c) Ermittlung der Bodenkennwerte

Das Einzugsgebiet des Mülibachs ist der Klasse 'Flyschlandschaften', Kategorie D (Basiswert), zuzuordnen.

Massgebende Regendauer und -intensität

Es werden die Starkniederschlagskarten des Hydrologischen Atlas der Schweiz verwendet.

1. Zuordnung der Extremalverteilung zum Einzugsgebiet aus der Karte Nr. 2.4 des Hydrologischen Atlas der Schweiz.

—> 2. Extremalverteilung

2. Aus den vier Starkniederschlagskarten erfolgt die Bestimmung der folgenden Werte:

– 1stündiger 100jähriger Niederschlag:	—>	78 mm
– 24stündiger 100jähriger Niederschlag:	—>	165 mm
– 1stündiger 2.33jähriger Niederschlag:	—>	25 mm
– 24stündiger 2.33jähriger Niederschlag:	—>	63 mm

3. Einsetzen der Werte gemäss der Legende in Kap. 3.2:

$$i_{t,T} = C * t^b * \exp \left[0.248 \left(\ln \frac{A * t^a}{C * t^b} \right) * (y(T) - 0.0577) \right]$$

$i_{t,T}$ muss, wie in Fig. 18 dargestellt, mittels Iteration gefunden werden:

$$i_{t,T} = 2 \text{ h}$$

Durch Einsetzen der Werte erhält man:

$$i_{2,100} = 25 * (2^{-0.742}) * \exp((0.248) * (1.10 * (4.6 - 0.577))) = 45.5 \text{ mm / h}$$

Weitere Parameter

Für die restlichen Parameter (Berechnungsschritte 9-13 in Fig. 15) kann festgestellt werden:

- Schmelzwasseraequivalent: Im Prinzip keine Erhöhung notwendig, die grössten Hochwasser entstehen vorzüglich im Sommer ohne signifikanten Einfluss von schmelzendem Schnee im hochwasserrelevanten Einzugsgebiet.
- Befestigte Fläche im Einzugsgebiet: Im Mülibach vernachlässigbar.
- Ganglinienkorrektur: Die massgebende Regendauer beträgt weniger als drei Stunden und das Einzugsgebiet ist kleiner als 10 km², jedoch grösser als 1 km². Daher wird eine Ganglinienkorrektur gemäss Tab. 6 durchgeführt.
- Gletscherabflussanteil: Das Einzugsgebiet weist keine Gletscher auf.

Hochwasserberechnung

Durch Einsetzen der Hochwasserformel in Kap. 2.3.3 in Teil I erhält man eine Hochwasserspitze von 13.5 m³/s (Fig. 18), was eine spezifische Abflussspitze von 5.2 m³/s/km² ergibt. Dies ist ein relativ hoher Wert, welcher jedoch angesichts der Starkniederschlagssituation am Pilatus plausibel erscheint.

5.2.2 Feldaufnahmen

A) Abschätzung der Murfähigkeit im Gelände

Der Kegelbereich des Mülibachs ist überbaut. Die Untersuchungen müssen sich auf die Bereiche entlang des Gerinnes weiter oben konzentrieren. Oberhalb Kote 555 finden sich vereinzelte grosse Blöcke sowie levéeähnliche Aufschichtungen von Lockermaterial. Das Durchschnittsgefälle in diesem Abschnitt beträgt nur ca. 12%. Es erscheint jedoch durchaus möglich, dass Murgänge bis in diese Bereiche und weiter hinunter vordringen können. Bei der anschliessenden Begehung entlang des Baches ist auf weitere Hinweise zu achten.

B) Aufnahmen entlang des Gerinnes

Vorgegangen wird analog zum Sandbach, Grindelwald. Die vorgeschlagenen Gerinneabschnitte zur Abschätzung des erodierbaren Volumens sind in Tab. 14 zusammengefasst.

Gerinneabschnitt a, Kote 530 - 590 (Abb. 32)

Da der Verlagerungsprozess nicht eindeutig geklärt ist, sind im Hinblick auf die Berechnung der Transportkapazität, Querprofile aufzunehmen. Der gesamte Gerinneabschnitt ist unverbaut (Lockermaterialsohle) und ist als Umlagerungsstrecke zu bezeichnen. Die erwähnten Spuren eines früheren Ereignisses dürften sicher mehrere Jahre alt sein (1979?). Es besteht die Gefahr von Verklausungen. Im Gerinne sind Stämme und Äste vorhanden.

Gerinneabschnitt b, Kote 590 - 700 (Abb. 33)

Gerinne unverbaut, Gefälle ca. 15% im Durchschnitt, maximal 22%. Auch hier sind keine klaren Spuren von Murgängen zu erkennen, levéeähnliche Aufschichtungen von Gesteinsmaterial seitlich des Gerinnes existieren jedoch auch hier. Aufnahme von zwei bis drei Querprofilen. Der Charakter des Gerinneabschnittes könnte als "Umlagerungsstrecke mit mehrheitlich Erosion" bezeichnet werden. Bei Koten 620 und 650 befinden sich grobe Blöcke, welche das Gerinne stabilisieren. Wie im Gerinneabschnitt a besteht die Gefahr von Verklausungen durch Wildholz.

Tab. 14 Abschätzung der erodierbaren Kubaturen im Mühlbach, Hergiswil

Bezeichnung des Ge- schiebe- herdes	Länge des Gerinne- abschnitts [m]	Korrektur- faktor für die Kubaturen [-]	Erosions- höhe [m]	Erosions- breite [m]	Erosions- mächtigkeit [m]	Erosions- volumen im Geschiebeherd [m ³]	Erosionsvolumen im Gerinne- abschnitt [m ³]	Ablagerungen im Gerinne- abschnitt [m ³]	+/- Bilanz für für jeden Ge- rinneabschnitt [m ³]
A	424	0.9	0.0	4.0	0.3	458	2463	100	2363
A1	424	1.0	3.0	0.0	0.5	636			
A2	20	0.5	4.0	0.0	0.3	12			
A3	30	1.0	4.0	0.0	1.5	180			
Aa	699	0.8	0.0	2.0	1.0	1118			
Ab	466	0.5	0.0	0.5	0.5	58			
B	532	0.7	0.0	6.0	0.5	1116	1754	200	1554
B1	532	0.8	3.0	0.0	0.5	638			
C	415	0.8	0.0	4.0	0.3	399	1611	800	811
C1	415	1.0	5.0	0.0	0.5	1038			
Ca	437	0.8	0.0	1.0	0.5	175			
D	277	0.6	0.0	4.0	0.5	332	664	200	464
D1	277	0.6	4.0	0.0	0.5	332			
E	165	0.8	0.0	5.0	0.5	330	832	100	732
E1	165	1.0	5.0	0.0	0.5	412			
E2	20	0.5	10.0	0.0	0.3	30			
E3	20	1.0	10.0	0.0	0.3	60			
F	440	0.8	0.0	7.0	1.5	3699	5461	2500	2961
F1	440	1.0	8.0	0.0	0.5	1761			
G	289	1.0	0.0	10.0	2.0	5772	6696	289	6407
G1	289	1.6	4.0	0.0	0.5	924			
H	245	0.9	0.0	5.0	1.0	1103	3279	300	2979
H1	245	1.0	5.0	0.0	0.5	613			
Ha	695	1.0	0.0	1.5	1.5	1563			
I	755	0.5	0.0	4.0	1.0	1511	2461	300	2161
I1	755	0.6	8.0	0.0	0.2	725			
I2	50	0.5	30.0	0.0	0.2	150			
I3	30	0.5	50.0	0.0	0.1	75			
J	764	0.7	0.0	1.5	1.0	802	802		802

Legende:

- A - J: Gerinneabschnitte mit Sohlenerosion
 1: zusätzlich beidseitige Böschungserosion
 2, 3: einzelne Geschiebeherde



Abb. 32 Gerinneabschnitt a

Gerinneabschnitt c, Kote 700 - 765 (Abb. 34)

Mittleres Gefälle 17%. Das Gerinne ist mit Ausnahme einer ca. 20 Meter langen Mauer auf der rechten Seite bei Kote 720 unverbaut. Vereinzelt grössere Blöcke in der Sohle können vom letzten Ereignis stammen. Direkte Hinweise auf Murgänge finden sich nicht. Bei Kote ca. 700 kann eine grössere Feststoffmenge abgelagert werden (Gefälle ca. 9%, Ausbreitung des Materials bis ca. 20 m möglich).

Gerinneabschnitt d, Kote 765 - 825 (Abb. 35)

Das Gerinne ist nun weitgehend natürlich. Das Gefälle weist ca. 24% im Durchschnitt auf, mit Maximalwerten von mehr als 30%. Im Vergleich zu den unteren Abschnitten ist es generell breiter geworden (ca. 8 m). Der einzige sichtbare anthropogene Eingriff befindet sich bei der Brücke, Kote 825. An der Obergrenze des Abschnittes befindet sich eine kleine Mauer.

Spuren eines früheren Ereignisses sind nun deutlicher sichtbar. Dies zeigt sich primär an grösseren Blöcken in der Sohle und Fragmenten von Levées. An vereinzelt Stellen (z. B. Kote 815) kann sich Material ablagern.



Abb. 33 Gerinneabschnitt b



Abb. 34 Gerinneabschnitt c



Abb. 35 Gerinneabschnitt d

Gerinneabschnitt e, Kote 825 - 865 (Abb. 36)

Gefälle mindestens 21%, unverbaut. Wiederum keine klaren Spuren eines früheren Ereignisses. Spuren vereinzelter Nachböschungsvorgänge sind noch feststellbar. Eine kleinere Ablagerungsmöglichkeit besteht bei Kote 825 (Gefälle hier ca. 16%).

Gerinneabschnitt f, Kote 865 - 960 (Abb. 37)

Auch hier sind die Spuren wiederum teilweise verwischt. Einzelne grosse Blöcke im Gerinne könnten durch Murgänge verlagert worden sein. Weitere Hinweise sind nicht ersichtlich. Bei Koten 880 und 935 können grössere Feststoffvolumina zurückgehalten werden. Das Durchschnittsgefälle beträgt ca. 26%.

Gerinneabschnitt g, Kote 960 - 1030 (Abb. 38)

In diesem Abschnitt finden sich eindeutige Hinweise auf eine Murgangtätigkeit des Baches: Deutliche Spuren seitlicher Levées, Ablagerung groben Blockmaterials sowie Fragmente von Murköpfen. Das Gefälle beträgt hier generell über 20%. Die Frage ist, ob ein Murgang von hier aus weiterfliessen kann. Dabei sind vor allem Gefällsverhältnisse, etwaige Hindernisse im Bachbett sowie die untenliegenden Ablagerungsmöglichkeiten von Bedeutung (s. Fazit). Hingegen wird hier aber die Wahrscheinlichkeit, dass ein Murgang im Gerinne selbst entsteht, als klein erachtet (Durchschnittsgefälle bei relativ grobblockigem Material ca. 23%).



Abb. 36 Gerinneabschnitt e



Abb. 37 Gerinneabschnitt f



Gerinneabschnitt g

Gerinneabschnitt h, Kote 1030 - 1115 (Abb. 39)

Wiederum Hinweise auf Murgangaktivitäten (Levéés, Ablagerung grosser Blöcke). Das Gerinne weist hier ein sehr hohes Gefälle auf und ist eine Umlagerungsstrecke mit vorwiegend Erosion. Ablagerungen sind möglich.

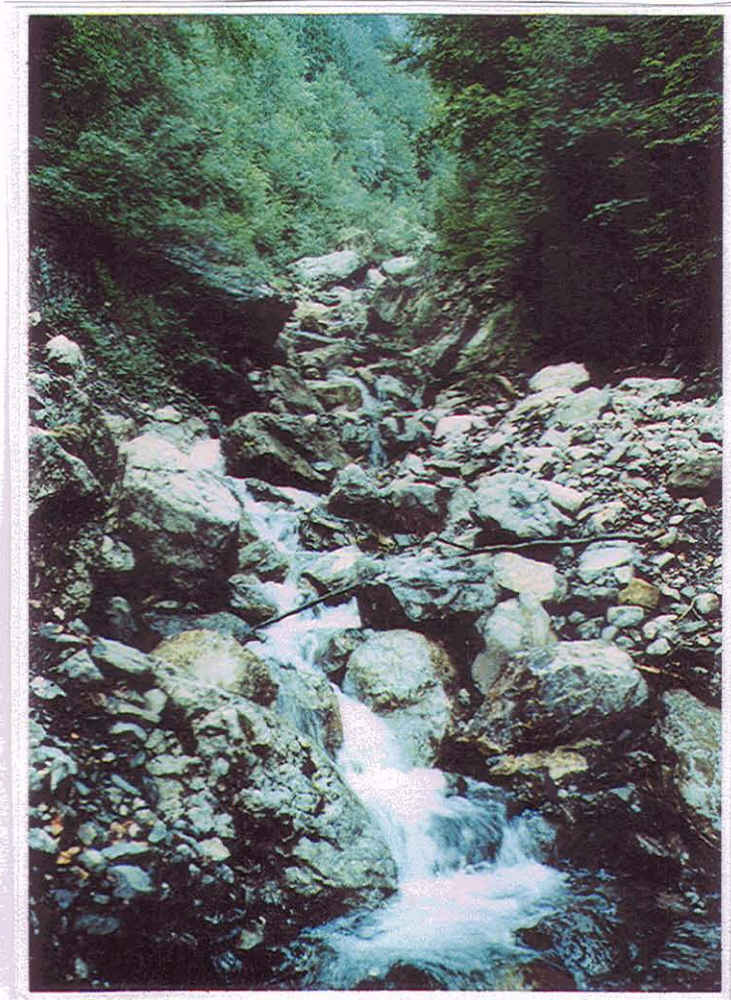


Abb. 39 Gerinneabschnitt h

Gerinneabschnitt i, Kote 1115 - 1500 (Abb. 40)

Das Gerinne ist wiederum viel enger und verläuft zu einem grösseren Teil auf Fels. Durch die zusätzliche Abtreppung ist die Erosionsleistung beschränkt. Ablagerungen sind in beschränktem Umfange auf den Felsstufen möglich.

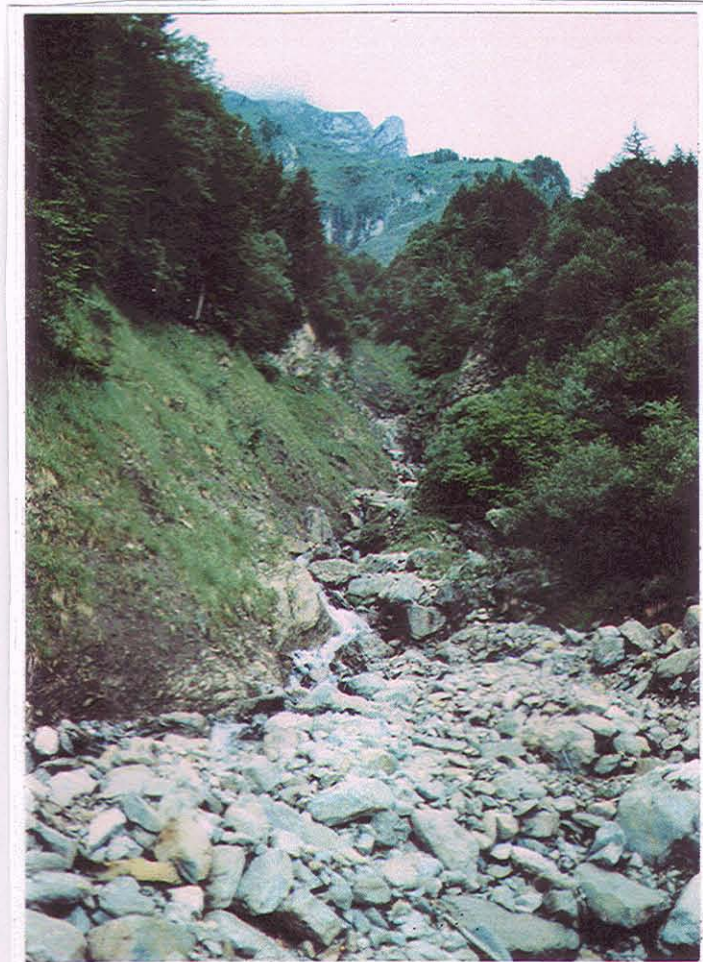


Abb. 40 Gerinneabschnitt i

Gerinneabschnitt j, Kote 900 - 1090 (Seitengerinne)

Dieser Gerinneabschnitt fliesst als Seitengerinne in den Gerinneabschnitt f ein, wo der entsprechende Feststoffeintrag einzurechnen ist. Der kleine nördliche Zubringer erhöht das zu bewältigende Feststoffvolumen um ca. 800 m³, vorausgesetzt, der Eintrag erfolgt zur selben Zeit wie das Ereignis im Hauptgerinne. Ansonsten wäre zu überprüfen, ob das verlagerte Feststoffvolumen im Hauptgerinne weiterverfrachtet werden kann und ob allenfalls die Gefahr eines Aufstaus besteht.

Fazit aus der Feldbegehung

Das Feststoffpotential rekrutiert sich im Mühlibach vorwiegend aus der Sohle und aus den Böschungen. Es beträgt total ca. 26'000 m³. Demgegenüber stehen geschätzte Ablagerungsmöglichkeiten für knapp 5'000 m³ zur Verfügung. In einem weiteren Schritt ist deshalb zu prüfen, inwiefern diese Schätzungen durch Berechnungen oder durch weitergehende Überlegungen abgestützt werden können. Auch die Art des Verlagerungsprozesses spielt dabei eine Rolle.

Obschon eindeutige Spuren von Murgängen im untersten Gerinnebereich fehlen, muss der Mühlibach als murfähig eingestuft werden. Dies geschieht aus folgenden Überlegungen:

- Aus dem Gerinnesystem an der rechten Flanke des Pilatus können Murgänge abgehen (Gefälle in der Regel über 28%). Spuren in den oberen Gerinneabschnitten belegen diese Annahme.
- Murgänge können laufend Material aufnehmen, so dass ihre Masse nach relativ kurzer Wegstrecke mehrere tausend m³ umfassen dürfte.
- Die Ablagerungsmöglichkeiten (Materialverlust?) sind in den oberen Gerinneabschnitten beschränkt, so dass bis zum Gerinneabschnitt g (ca. Kote 1000) mit einer Masse von ca. 6000 m³ gerechnet werden dürfte. Vorbehalten bleibt die Annahme, dass sich die zu erwartende Kubatur auf mehrere Murgangwellen aufteilt.
- Es muss damit gerechnet werden, dass ein Murgang weiter bachabwärts fliesst. Im nächstunteren Gerinneabschnitt f bestehen zwar grössere Ablagerungsräume, das Gefälle nimmt jedoch kaum ab. Gerinnestrecken, deren Gefälle höchstens 50% bzw. deren Gerinnebreite doppelt so gross ist wie die des nächstoberen Gerinneabschnittes (vgl. Seite 36 in Teil I), sind nur lokal vorhanden. Gerinnebreiten von bis zu 25 Metern sind die Ausnahme. Ähnliche Gefälls- und Breitenverhältnisse wie in f bestehen auch im Gerinneabschnitt e. Ablagerungen dürften sich etwa in der im Gelände geschätzten Grössenordnung bewegen (insgesamt höchstens gegen 5'000 m³).
- Obschon unterhalb des Gerinneabschnittes d, Kote 765, das Durchschnittsgefälle weniger als 20% beträgt, ist mit einer Fortsetzung eines Murganges aus den oberen Gerinneabschnitten zu rechnen. Dies wird vor allem dem Umstand zugeschrieben, dass keine abrupten Änderungen (Abtreppungen, lokale Ausweitungen des Gerinnes) der Gerinneverhältnisse auftreten. Überdies bestehen, wenn auch undeutlich, Spuren von Murgängen.
- Im vorliegenden Verfahren wird hinsichtlich der Murfähigkeit von Wildbächen empfohlen, auf der sog. "sicheren Seite" zu operieren. Der Mühlibach wird deshalb der Kategorie "murfähig mit Ablagerungsmöglichkeiten" zugeordnet.

5.2.3 Auswertungen

Die Auswertungen werden nun gemäss Kapitel 5.2, S. 45/46 in Teil I durchgeführt. Die Feststoffkubatur des Murganges bzw. der Murgangwellen beträgt vermutlich über 20'000 m³, wobei es stark darauf ankommt, ob die im Gelände geschätzten Ablagerungen im Ereignisfall auch stattfinden. Falls nicht, ist mit einer etwas höheren Kubatur von ca. 25'000 m³ zu rechnen. Aufgrund der Gerinneverhältnisse im unteren Bereich des Mühlibachs dürfte der niedrigere Wert allerdings der realistischere sein. Damit ergäbe sich eine spezifische Feststoffkubatur von $20'000/2.6 = 7700 \text{ m}^3/\text{km}^2$, was etwas unter der Abschätzung im Rahmen der Vorarbeiten liegt. Ein Vergleich mit Feststofffrachten aus Ereignissen in anderen schweizerischen Wildbächen zeigt (Fig. 14, Teil I), dass diese Kubatur realistisch sein dürfte.

6. Glossar

Abschätzung	Bestmögliches Ermitteln, z. B. des Ausmasses einer Fläche, wenn diese nicht oder nicht vollständig durch Messung bestimmt werden kann.
Akkumulation	Ansammlung und Ablagerung (Material und Prozess) von erodiertem und verlagertem Material
Auflandungsstrecke/ Akkumulationsstrecke/ Ablagerungsstrecke	Gerinneabschnitt, dessen Sohle sich infolge Geschiebeablagerung hebt.
Beharrungsstrecke	Abschnitt eines alluvialen Fliessgewässers, in dem das erodierte Material durch nachfolgendes ersetzt wird, womit sich die Höhenlage der Sohle nur wenig verändert.
Beitragende Fläche	Unmittelbar an das Gerinne anschliessende Flächen im Einzugsgebiet, welche bei einem Niederschlag nach Auffüllen des Bodenspeichers direkt zum Abfluss beitragen.
$\frac{\text{Beitragende Fläche}}{\text{Einzugsgebietsfracht}} = \text{Abflusskoeffizient (nach Modell Koella)}$	
Deckschicht	Oberste Schicht des Fluss- oder Bachbettes
Denudation	Flächenhafter Abtrag
Einzugsgebiet	Durch die topographische und/oder unterirdische Wasserscheide abgegrenztes Gebiet, dessen Abfluss und/oder Feststofffracht am Ausgangspunkt erfasst werden kann.
Ereignis	Wildbachaktivität, bei welcher Feststoffe in einem (potentiell) schadenbringenden Ausmass erodiert, transportiert und abgelagert werden.
Erosion	Festgesteins- und Lockermaterialabtrag durch geomorphologische Prozesse
Erosionsbasis	Niedrigster erosionsresistenter Punkt eines Bachlaufes (Sohlenfixpunkt), von welchem aus die Erosion bergwärts fortschreitet.
Erosionsstrecke	Gerinneabschnitt, in welchem mehr Material ab- als zugeführt wird und der sich folglich eintieft.
Feilenanbruch	Beidseitige, durch Tiefenschurf verursachte Einhänge in Lockergesteinen oder wenig resistenitem Fels.
Feinmaterial	Nicht zur Bettbildung beitragende Kornfraktionen (in Wildbächen meist Sandfraktion und kleiner)
Festgestein	Gesteine mit dichtem Gefüge und hoher Kornverbandsfestigkeit (DIN)
Feststoffe (mineralischer Ursprung)	Gesamtheit der festen Stoffe, die durch gravitative und Transportprozesse verlagert werden.
Feststofffracht	Masse oder Volumen der Feststoffe (des Geschiebes = Geschiebefracht, der Schwebstoffe = Schwebstofffracht), die in einem bestimmten Zeitabschnitt (z. B. während eines Ereignisses) durch einen Querschnitt transportiert wird.

Feststofffracht, spezifische	Quotient aus Feststofffracht und oberirdischem Einzugsgebiet
Feststoffganglinie	Graphische Darstellung des Feststoffdurchsatzes als Funktion der Zeit
Feststoffhaushalt	Mengenmässige Gegenüberstellung des Feststoffeintrags und -abtransports unter Berücksichtigung von Erosion und Ablagerung innerhalb eines Einzugsgebietes oder einer Gewässerstrecke.
Feststoffherd/ Geschiebeherd	Stelle des Einzugsgebietes, aus welcher die Feststoffe/das Geschiebe in das Gerinne geliefert oder vom Fließgewässer aufgenommen werden.
Feststofflieferung/ Geschiebelieferung	Verlagerung von Feststoffen in das Gerinne. Bei Verwendung des Begriffs 'Geschiebe- oder Feststofflieferung' ist generell zu unterscheiden zwischen – ereignisgebundener Lieferung, welche hauptsächlich für die am Kegelhals auftretende Feststofffracht ('Ereignisfracht') entscheidend ist und – langfristiger Lieferung in das Gerinne, welche einen wesentlichen Bestandteil des Geschiebehaushaltes im Einzugsgebiet darstellt.
Feststoffpotential	Bei einem künftigen Ereignis in das Bachgerinne eingetragene und vom Bach mobilisierbare Feststoffkubatur
Feststofftransport/ Geschiebetransport/ Schwebstofftransport	Masse oder Volumen der Feststoffe (des Geschiebes, der Schwebstoffe), die in der Zeiteinheit durch den betrachteten Querschnitt treibt.
Feststoffführung	Menge der Feststoffe, die pro Zeiteinheit durch einen Gerinnequerschnitt transportiert wird. Auch als Feststofftransport bezeichnet.
Gebietsabtrag	Feststoffaustrag aus einem Einzugsgebiet, i. d. R. auf ein Jahr bezogen
Gerinne	Wasserlauf mit dazugehöriger Sohle und Böschung
Gerinneabschnitt	Streckenteil des Gerinnes, der bezüglich Feststoffherde, Feststofflieferung sowie Feststofftransport mehr oder weniger homogen ist.
Geschiebe	Auf der Gerinnesohle transportierter, relativ zum übrigen Material grobkörniger Feststoffanteil.
Geschiebe-relevante Fläche	Diejenige Teilfläche des Einzugsgebietes, aus welcher Feststoffe kurz- oder längerfristig in das Gerinne gelangen.
Geschiebeaufbereitung, Geschiebeproduktion	Bereitstellung von Feststoffen im Bereich des Geschiebeherdes
Geschiebesammler	Mit einem Auslaufbauwerk versehener Geschiebeauffangraum
Geschiebetrieb	Als Geschiebetrieb wird die Masse oder das Volumen des Geschiebes bezeichnet, das vom Wasser innerhalb einer definierten Zeit (meistens Sekunde) durch einen Querschnitt von 1 m transportiert wird. Abhängig von verschiedenen Bedingungen kann das Wasser nur soviel Material transportieren, bis die Transportkapazität erschöpft ist. Wird sie überschritten, kommt das Geschiebe an Ort und Stelle zur Ablagerung.
Hang	Geneigtes Gelände, in welchem feststoffliefernde Prozesse ablaufen können, ohne dass sich der grösste Teil des verlagerten Materials bereits vor dem Erreichen des Gerinnes in Runsen konzentriert.
Hangneigung	In Grad (°) gemessenes Gefälle eines Hanges
Hangschutt	Durch Verwitterung entstandener Schutt, der sich ohne grosse Verfrachtung in räumlicher Nähe seines Entstehungsortes unter Schwerkrafteinwirkung abgelagert hat.

Hinterfüllung	Natürliche oder künstliche Materialaufschüttung auf der Bergseite eines Bauwerkes
Hochwasser	Oft mit raschem Anstieg verbundene hohe Wasserführung
Hydraulischer Radius	Quotient aus benetzter Querschnittsfläche und benetztem Umfang
Jährlichkeit	Mittlere Wiederkehrperiode (Anzahl Jahre) eines Ereignisses bestimmten Ausmasses
Kar	Nischenartige Hohlform an einem ehemals vergletscherten Hang. Es wird im Rücken und auf beiden Seiten durch steile, häufig zu Graten emporführende Wände (= Karwände) begrenzt. Der wannenförmig vom Eis ausgeschliffene Karboden (eventuell mit Karsee) wird talwärts durch die Karschwelle abgeschlossen
Kegelhals	Oberster Teil des Kegels beim Austritt des Baches in das Tal des Vorfluters
Keilanbruch	Durch Kolkerosion entstandene Erosionsform in Lockermaterial bzw. wenig resistenitem Fels.
Kolk	Örtlich begrenzte, durch lokale Wasserwalzen verursachte Eintiefung der Sohle, meist unterhalb von natürlichen oder künstlichen Abstürzen.
Korn	Einzelkomponente klastischer Sedimente
Korngrösse, Korndurchmesser	Experimentell ermittelter Durchmesser von Feststoffkomponenten
Korngrössenanalyse	Bestimmung von Korngrössengruppen mit Hilfe von Siebung, Schläm-mung, Ausmessung usw.
Kornverteilung	Korngrössenzusammensetzung der Feststoffe in Gewichtsprozenten
Kriechen	Langsame, von Auge nicht wahrnehmbare Hangabwärtsbewegung zusammenhängender Lockermaterialmassen
Kumulative Gerinnelänge	Gesamtlänge sämtlicher im Hochwasserfall wasserführenden Gerinne im Einzugsgebiet
Levéé	Seitliche, entlang der Fliessbahn parallel verlaufende Schuttwülste aus Murgangmaterial
Lockermaterial (-gestein)	Nicht oder nur schwach verfestigte Sedimente unterschiedlicher Korngrös-se, Korngrössenverteilung und Gesteinsfestigkeit (DIN)
Lockermaterialsohle	Auf Lockermaterial verlaufendes Bachbett
Massenverlagerung	Verlagerung von Feststoffen unter Einwirkung eines Transportmediums und/oder der Schwerkraft
Moräne	Vom Gletscher um- und abgelagertes Material und die dadurch hervor-gebrachte Form
Murgang	In steilen Schutthalden, Hangpartien oder Wildbachgerinnen entstehendes Gemisch von Wasser und (auch organischen) Feststoffen hoher Feststoff-konzentration, welches sich unter starker erosiver Wirkung talwärts bewegt.
Murkegel	Kegelförmiges Ablagerungsgebiet eines murfähigen Wildbachs mit deutlich strukturierter Oberfläche
Murkopf	Steile Front eines Murganges
Murzunge	Zungenförmige Ablagerungswulst aus Murschutt
Pauschalgefälle	Schwerpunktgefälle, in der Regel ausgedrückt als dessen Tangens
Rinne/Runse	In der Regel nur sporadisch wasserführendes, durch Tiefenerosion entstan-denes Steilgerinne

Rotationsrutschung	Rutschung auf einer Gleitfläche, welche sich erst im Zusammenhang mit der Auslösung gebildet hat
Rückstau	Ansteigen des Wasserpiegels infolge Hindernis
Runsen	Eher kleine, in der Regel steile, meist nur sporadisch wasserführende Rinnen, die dem Haupt- oder Seitengerinne Feststoffe zuführen können.
Runsenanbruch	Anrissstelle von Runsen in Bachkegeln, Schutthalden/-kegeln und in Moränen, die durch plötzliche Eintiefung bei Hochwassern oder Murgängen entsteht.
Rutschung	Schnelle Massenbewegung entlang einer Gleitfläche im Untergrund
Rutschung, flachgründig	Massenbewegung entlang einer Gleitfläche in weniger als 2 Metern Tiefe
Rutschung, mittelgründig	Massenbewegung entlang einer Gleitfläche in 2 bis 10 Metern Tiefe
Rutschung, tiefgründig	Massenbewegung entlang einer Gleitfläche in 10 bis einigen 100 Metern Tiefe
Schleppkraft	Vom fließenden Wasser durch Reibung auf die Sohle ausgeübte Kraft, welche bei Überschreitung eines bestimmten Grenzwertes das Geschiebe mitreisst.
Schutt	Unverfestigte Masse von Gesteinsbrocken von verschiedener Grösse
Schuttkegel	Unterhalb Klüften oder Steinschlagrinnen entstandene Schutthalde mit nach unten zunehmenden Korngrößen
Schwebstoffe	Durch die Strömung in Schwebe gehaltener Feststoffanteil
Schwemmkegel	Fächer- bis kegelförmiges Ablagerungsgebiet eines Baches/Flusses aus vorwiegend feinkörnigen Feststoffen
Sedimente	Durch physikalische, chemische oder biologische Prozesse terrestrisch oder aquatisch abgelagertes Material.
Seitenerosion	Seitliche Unterspülung von Ufer und Hängen, vorwiegend im Prallhang
Sohle	Unterer Teil des Gewässerbettes (LHG)
Sohlenmaterial	Korngemisch der natürlichen Gewässersohle
Sohlenverflüssigung	Bewegung der Sohle infolge erhöhtem Wasserstand unter dem Einfluss der Schwerkraft
Stumme Zeugen	Objekte, Formen und Prozessspuren, die als Indizien für früher abgelau- fene Prozesse dienen.
Tiefenerosion	Eintiefung der Sohle
Translationsrutschung	Rutschung auf einer präformierten Gleitfläche
Transportkapazität	Vom Wasser maximal transportierbare Feststoffmenge in m ³ /s oder kg/s. Abhängig vom Abfluss, Gefälle, Gerinnebreite, Sohlenmaterial usw.
Uferanbruch	Erosionsform, welche durch Seitenschurf des Fließgewässers ohne gleichzeitige Bettvertiefung entsteht.
Uferrutschung	Abgleiten von Uferpartien
Verklausung	Verstopfen eines Wasserlaufes durch Holz und Feststoffe, verbunden mit einem Aufstau
Vermurung	Ablagerung von Murgangmaterial

Verstopfung	Teilweise oder ganze zeitlich begrenzte Auffüllung eines Bachlaufes z. B. infolge seitlichen Feststoffeintrages
Vorfluter	Gewässer, das ein anderes aufnimmt
Wiederkehrperiode	Zeitlicher Abstand, in dem ein Ereignis im Mittel entweder einmal erreicht oder überschritten wird.

7. Literaturverzeichnis

- Anastasi, G. 1984: Geschiebeanalysen im Felde unter Berücksichtigung von Grobkomponenten. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 70, ETH Zürich
- Aulitzky, H., 1989: The Debris Flows in Austria. IAEG Bull. N°40, 5-13
- Bunza, G., Karl, J., Mangelsdorf, J., 1976: Geologisch- morphologische Grundlagen der Wildbachkunde. Schriftenreihe der Bayer. Landesst. f. Gewässerkunde 11, 87 - 101
- EDI / BUWAL, 1978ff: Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz, Bern
- EJPD, (Eidg. Justiz- und Polizeidepartement) 1980: Bodeneignungskarte der Schweiz, Bern
- Fehr, R. 1987: Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen. Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren. Mitteilung Nr. 92 der VAW-ETH, Zürich
- Geiger, H., Röthlisberger, G., Stehli, A., Zeller, J. 1992: Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901 - 1970. In: Landeshydrologie und -geologie (Hrsg.): Hydrologischer Atlas der Schweiz, Karten 2.4. Bern / Birmensdorf
- Geiger H. Zeller, J., Röthlisberger, G. 1991: Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. Bd. 7, Grundlagen. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf
- Haeblerli, W., Rickenmann, D., Zimmermann, M., 1991: Murgänge. Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Ergebnisse der Untersuchungen. Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4/ Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 14, 77 - 88.
- Hampel, R. 1980: Die Murenfracht von Katastrophenhochwässern. Wildbach- und Lawinenverbau, Dezember 1980, H 2, 71 - 102.
- Hjulström, F. 1935: Studies of the Morphological Activity of Rivers as illustrated by the River Fyris. Bulletin of the Geological Institute of the University of Upsala
- Hodel, H. 1993: Untersuchung zur Geomorphologie, der Rauheit des Strömungswiderstandes und des Fließvorganges in Bergbächen. Diss. ETH Nr. 9830, Zürich
- Hofbauer, R. 1916: Eine neue Formel für die Ermittlung der grössten Hochwassermengen. Oesterr. Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst. 38 - 40.
- Hydrologischer Atlas der Schweiz, 1992
- Izzard, C. F. 1946: Hydraulics of runoff from developed surfaces. Proc. Highway Res. Board 26, 129 - 150.
- Johnson, A. M., Rodine, 1984: Debris Flow. In: Brunsden, D., Prior, D. B., (Hrsg.): Slope Instability. John Wiley & Sons
- Koella, E., 1986: Zur Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessungen. Eine Untersuchung über Zusammenhänge zwischen Gebietsparametern und Spitzenabflüssen kleiner Einzugsgebiete. Mitteilung Nr. 87 der VAW-ETH, Zürich
- Kronfellner-Kraus, G. 1982: Über den Geschiebe- und Feststofftransport in Wildbächen. Österr. Wasserwirtschaft 34, H. 1/2, 12 - 21
- Kronfellner-Kraus, G. 1984: Extreme Feststofffrachten und Grabenbildungen von Wildbächen. Interpräsent 1984, Bd. 2, 109 - 118.
- Kronfellner-Kraus, G. 1987: Zur Anwendung der Schätzformel für extreme Wildbach-Feststofffrachten im Süden und Osten Österreichs. Wildbach und Lawinenverbau, 51. Jg., H.106: 187 - 200

- Lehmann, C. 1993: Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen. Geographica Bernensia G42, Bern
- Melli, E. 1924: Die Dimensionierung städtischer Kanäle. Schweiz. Bauzeitung 12, 137 - 141
- Meyer-Peter, E., Müller, R. 1948: Formulas for Bedload Transport. Proc. 2nd Congr. IAHR, Stockholm.
- Mizuyama, T., Kobashi, S., Ou, G. 1992: Prediction of Debris Flow Peak Discharge. Interprävent, Bd. 4, 99 - 108
- Müller, R. 1943: Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen. Mittlg. Nr. 4, VAW-ETH Zürich
- Naef, F., Zuidema, P., Koella, E. 1986: Abschätzung von Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten. Abschätzung der Abflüsse in Fließgewässern an Stellen ohne Direktmessung. Bericht zum Teilprojekt C des Nationalen Forschungsprogramms Nr. 2 "Grundlegende Probleme des schweizerischen Wasserhaushaltes". Beiträge zur Geologie der Schweiz - Hydrologie Nr. 33. 195 - 233, Bern
- Pierson, T. C. 1980: Debris flows. An important process in high country gully erosion. Repr. from Review 39, J. of the Tussock Grasslands and Mountain Lands Inst. (N. Z.), Dec. 1980. 3 - 14
- Rickenmann, D., 1990: Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitteilung 103 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich
- Rickenmann, D., 1995: Beurteilung von Murgängen. Schweizer Ingenieur und Architekt 48, 1104 - 1108.
- Röthlisberger, G. 1991: Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. Berichte der Eidg. Versuchsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Nr. 330, Birmensdorf
- Shields, A. 1936: Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilung der Preuss. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Nr. 26
- Smart, G. M., Jaeggi, M.N.R. 1983: Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 64, Zürich
- Spreatico, M., Stadler, K., Aschwanden, H., 1986, 1988, 1991: Hochwasserabflüsse in schweizerischen Gewässern, I - IV. Mittlg. der Landeshydrologie und -geologie 7, 8, 16, 17. Bern
- Sydler, P.A., Widmoser, P., Zollinger, F. 1982: Statistische Untersuchungen von Extremabflüssen in kleinen Einzugsgebieten. Schlussbericht zum NF-Projekt, Institut für Kulturtechnik, ETH Zürich
- Takahashi, T. 1981: Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster. Natural Disaster Science 1, Vol. 3, 57 - 89
- Takahashi, T. 1989: Mechanics and Existence Criteria of Various Type Flows During Massive Sediment Transport. Int. Workshop on Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, Trent, Italy, B119-B130
- Van Steijn, H., De Ruig, J., Hoozeman, F., 1988: Morphological and mechanical aspects of debris flows in parts of the French Alps. Z. Geomorph. N.F. 32, 143 - 161
- VAW 1987: Anwendung von Hochwasserschätzmethode in kleinen natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz. Unterlagen zu den Seminaren mit Übungen. Zürich
- VAW 1992: Murgänge 1987. Projekt A6 zur Ursachenanalyse der Unwetter 1987. Zürich
- Vischer, D. 1980: Das höchstmögliche Hochwasser und der empirische Grenzabfluss. Schweizer Ingenieur und Architekt 40, 15 - 21
- Vischer, D., Naef, F. 1985: Hochwasserabschätzung zur Bemessung der Hochwasserentlastung von Talsperren. Wasser-Energie-Luft 77, H. 5/6

Weingartner, R., Spreafico, M., 1990: Analyse und Abschätzung von Hochwasserabflüssen - Eine Übersicht über neuere schweizerische Arbeiten. Deutsche Gewässerkundl. Mittlg. 34, 1/2, 42 - 45

Zeller, J. 1981: Starkniederschläge und ihr Einfluss auf Hochwasserereignisse. Elemente zur Abschätzung der Hochwasserabflüsse kleiner Einzugsgebiete. 2. Auflage des Berichts Nr. 126 der EAFV, Birmensdorf