

**Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen -
Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens**

Inauguraldissertation
der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Bern

vorgelegt von

Eva Gertsch

von Wengen BE

Leiter der Arbeit:

Prof. Dr. H. Kienholz

Geographisches Institut der Universität Bern

**Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen -
Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens**

Inauguraldissertation
der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Bern

vorgelegt von

Eva Gertsch

von Wengen BE

Leiter der Arbeit:

Prof. Dr. H. Kienholz

Geographisches Institut der Universität Bern

Von der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät angenommen.

Bern, 19. März 2009

Der Dekan:
Prof. Dr. U. Feller

Vorwort und Dank

Burglauenen, an einem Tag im Sommer 1982: Es blitzt und donnert beängstigend am Hintisberg oben. So stark, dass der Wartenberggraben viele Steine und Dreck bringt. Die Feuerwehr rast mit lauter Sirene hinter dem Haus eines kleinen Mädchens vorbei. Auch ihr Dädi muss in den Einsatz. Die Brücke zu Meyers Wohnhaus soll weggeschwemmt sein und das Erdgeschoss im Haus von Frau Jörg mit Steinen und Schlamm gefüllt. Das 5 jährige Mädchen zieht die orangen Biene-Maja Stiefel und seine gelbe Regenpellerine an, nimmt eine kleine rote Kinderschaufel aus Plastik und stapft in den Regen hinaus. Es geht zum betroffenen Haus, sucht seinen Vater und sagt: „Darf ich auch helfen schaufeln?“

Burglauenen, am 22. August 2005, 21:00: Es regnet seit zwei Tagen ununterbrochen und intensiv. Es ist dunkel, die Sicht ist schlecht, vernebelt. Das Tal wird durch ein lautes Rauschen und Tosen der Bäche und der Lütschine beherrscht. Ein Helikopter, der sich tief fliegend entlang der Bahnlinie einen Weg durch den Nebel ins abgeschlossene Tal sucht, braust dicht vor dem Haus vorbei. Eine Frau schaut und lauscht zum Fenster hinaus in die gespenstische Stimmung und vernimmt ein rumpelndes und grollendes Geräusch, das immer näher kommt. Nach langer Orientierungslosigkeit wird ihr plötzlich klar: Es muss der Wartenberggraben sein! Die Frau schlüpft ungeduldig in Bergschuhe und Regenjacke, schnappt sich im Vorbeigehen die Digitalkamera und rennt nach draussen, dem Wartenberggraben zu. Dieser führt Hochwasser und ein Murgang schießt die Schale hinab. Obwohl sie eigentlich weiss, welch grosse Energie Murgänge haben können, ist die Frau tief beeindruckt von der Gewalt dieses Schauspiels, vom bis in den Bauch spürbaren dumpfen Grollen und Rumpeln der herunterdonnernden Steine und Blöcke und eine Erinnerung aus ihrer Kindheit kommt auf: der extrem intensive, erdige Geschmack, der in der feuchten Luft liegt. Sie versucht, diesen kurzen Moment ganz tief in sich zu speichern, macht schnell ein Foto und verlässt danach möglichst rasch den Gefahrenbereich.

Die vorliegende Arbeit ist zwischen 2004 und 2009 im Rahmen des Forschungsprojekts „Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen“ entstanden. Finanziert wurde sie vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) und vom Geographischen Institut der Universität Bern (GIUB), fachlich unterstützt von der Gruppe für Operationelle Hydrologie (GHO), Untergruppe Feststoffe.

Diese Arbeit bot mir die einmalige Gelegenheit, über 100 Wildbachsysteme und rund 80 real abgelaufene Wildbachereignisse in der ganzen Schweiz zu analysieren. Ich konnte dabei eins zu eins spannende Einblicke in die Prozessdynamik von verschiedensten Wildbächen erhalten. Diese Erfahrungen verstärkten bei mir die Faszination für Wildbäche immer wieder aufs Neue. Die verschiedenen Arbeiten - im Gelände, am Computer und bei der Entwicklung des Geschiebeabschätzverfahrens - bildeten für mich eine ideale und abwechslungsreiche Kombination aus fachlichen, kreativen und körperlichen Herausforderungen.

Zum Gelingen dieser Arbeit haben sehr viele Leute einen grossen Beitrag geleistet:

Prof. Dr. Hans Kienholz hat durch seine grosse fachliche Kompetenz, seine praxisnahe Ausrichtung sowie durch seinen unkomplizierten menschlichen Umgang diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht und mir viele Türen geöffnet. Seine Art, einen unter vollstem Vertrauen selbstständig arbeiten und wirken zu lassen, in wichtigen Situationen und bei dringenden Fragen aber jederzeit zur Seite zu stehen, waren für mich eine ideale Betreuung. Ich möchte mich bei ihm dafür ganz herzlich bedanken.

Prof. Dr. sc. techn. (ETH) Manfred Spreafico hat mich als Projektleiter und Koreferent begleitet und die Arbeit von Beginn weg vollumfänglich unterstützt und mit grossem Interesse verfolgt. Die wertvollen Diskussionen und Anregungen haben massgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Vielen Dank.

Danken möchte ich allen **Diplomanden/innen, Forschungspraktikanten/innen, Seminarbesucher/innen**, die voller Motivation einen Beitrag zu meiner Dissertation geleistet haben. Es sind dies Warin Bertschi, Samuel Bissig, Monika Fässler, Georg Heim, Markéta Jetel, Eva Kämpf, David Kienholz, Barbara Locher, Stefan Ott, Michael Pauli, Daniela Schluep, Annina Schmidhauser, Reto Sterchi, Christian Wüthrich und Stefan Zingg. Vielen Dank, eure Arbeit war sehr wertvoll für mich.

Durch die Analyse von früheren Ereignissen war ich auf Ereignisdokumentationen, Fotos, Beschreibungen, Erlebnisberichte etc. von aussen angewiesen. Dabei konnte ich auf ganz viele interessierte und hilfsbereite Leute von **kantonalen Fachstellen, privaten Büros oder anderen Stellen** zählen, die mir die benötigten Unterlagen zur Verfügung stellten. Ich möchte mich bei ihnen allen ganz herzlich bedanken:

Es sind dies in alphabetischer Reihenfolge: Peter Amacher (Geo Uri GmbH, Amsteg), Alexandre Badoux (WSL, Birmensdorf), Andri Bischoff (TBA Kt. GR, Chur), Paul Blumer (Bettschen und Blumer AG, Unterseen), Michelle Bollschweiler (Uni Fribourg), Dominique Bérod (ehem. SRCE Kt. VS, Sion), Klaus Budmiger (Flotron AG, Meiringen), Therese Bürgi (BAFU, Ittigen), Heini Buri (KAWA Kt. BE, Interlaken), Yves Châtelain (SESA Kt. VD, Lausanne), Alberto Conelli (ehem. UCA Kt. TI, Bellinzona), Fabian Dolf (Geotest AG, Davos), Werner Eicher (ehem. AWR Kt. OW, Sarnen), Fritz Epp (TBA Kt. UR, Altdorf), Andreas Fink (Universität Köln), Eva Frick (tur GmbH, Davos), Michael Fuchs (CSD, Altdorf), Marzio Giamboni (ehem. BAFU, Ittigen), Christoph Graf (WSL, Birmensdorf), Andreas Götz (BAFU, Ittigen), Kaspar Graf (Geotest AG, Zollikofen), Alessandro Grasso (BAFU, Ittigen), Jörg Häberle (KAWA Kt. BE, Interlaken), Christoph Hegg (WSL, Birmensdorf), Helicrew Air Glaciers (Lauterbrunnen), Sepp Hess (AWR Kt. OW, Sarnen), Philippe Hohl (SESA Kt. VD, Lausanne), Gabi Hunziker (geo7, Bern), Simone Hunziker (BAFU, Ittigen), Markus Imhof (ehem. geo7 AG, Bern), Peter Kolb (ehem. Gemeindepräsident, Lüschtental), Bernhard Krummenacher (Geotest AG, Davos), Richard Kuntner (Teyssere und Candolfi AG, Visp), Christoph Lehmann (Lehmann Hydrologie, Urtenen-Schönbühl), Serena Liener (geo7 AG, Bern), Markus Liniger (Geotest AG, Horw), François Xavier Marquis (Etu-des Hydrologiques et Géologiques, Monthey), Salome Martin (Oeko-B AG, Stans), Curdin Mengelt (Amt für Wald Kt. GR, Zuoz), Manuel Nitsche (WSL, Birmensdorf), Stefano Pellandini (ehem. UCA Kt. TI, Bellinzona), Eric Pointner (Rovina + Partner AG, Varen), Dieter Rickenmann (WSL, Birmensdorf), Hans Romang (ehem. tur GmbH, Davos), Christine Röthlisberger (Academia Engiadina, Samedan), Ueli Ryter (KAWA Kt. BE, Interlaken), Ralf Schai (Revierförster, Lauterbrunnen), Jules Seiler (Geoplan Naturgefahren, Steg), Peter Steinegger (Kantonsforstamt SZ, Schwyz), Urs Thali (Ingenieurbüro, Göschenen), Christian Tognacca (beffa tognacca GmbH, Schwyz), Beat Tschanz (ehem. Flotron AG, Meiringen), Albert Wenger (Feuerwehr-

kommandant, Grindelwald), Christian Wilhelm (Amt für Wald Kt. GR, Chur), Andy Wipf (ETH, Zürich), Markus Zimmermann (NDR Consulting, Thun) und alle die ich vergessen haben sollte.

Die stets unkomplizierte und herzliche Atmosphäre in der **Gruppe für Angewandte Geomorphologie und Naturrisiken (AGNAT)** hat für das Gelingen dieser Arbeit eine grosse Rolle gespielt. In diesem angenehmen Umfeld zu arbeiten, war immer eine Freude und die legendären Kaffeepausen im 4. Stock, sowie andere Schabernacke werden für mich unvergesslich bleiben und mich immer an die schöne Zeit an der Uni erinnern. Speziell möchte ich meinen Leidens- und Freudengenossinnen Judith Dobmann und Franziska Schmid für den wichtigen fachlichen Austausch und die gegenseitige moralische Unterstützung danken.

Seppi Berwert, Beat Ettl, Tom Wüthrich, Azadeh und Urs Hunziker-Soleimany von der **belop gmbh, Ingenieure und Naturgefahrenfachleute, Stalden OW** ermöglichten mir durch flexible Arbeitszeitregelung nicht nur eine berufsbegleitende Durchführung dieser Arbeit in den letzten zweieinhalb Jahren, sondern brachten mich auch durch viele Anregungen aus der Praxis zu neuen Impulsen. Zehren konnte ich vor allem auch vom Teamgeist, vom Herzblut und von der Freude an der Arbeit, die im Büro in Stalden gelebt wird und einem immer wieder sehr motiviert. Danke und ich freue mich riesig auf die gemeinsame Zukunft mit Euch!

Besonderer und sehr grosser Dank gilt den „Gegenlesern“ **Andy Kipfer (geo7 AG), Urs Hunziker (belop gmbh)** und **Hans Gertsch** für das sorgfältige und kritische Gegenlesen der Arbeit, für die ehrliche und konstruktive Kritik und für den gnadenlosen Kampf gegen Schachtelsätze, Grammatik- und Rechtschreibfehler.

Eine grosse Cervelat verdient hat sich Boarder Collie Hündin **Leika**, die mich auf viele Wildbachtouren mit Freude begleitet hat, mir beim Vertilgen des mittäglichen Picknicks jederzeit behilflich war und mich durch ihre nie enden wollende Fitness zu Höchstleistungen im Bezwingen von insgesamt einigen tausend Höhenmetern getrieben hat.

Vielen Dank auch an alle meine **Kollegen und Kolleginnen** und an meine **Geschwister** für Unterstützungen, Zusprüche und Hilfen verschiedenster Art und Weise während der letzten Jahre und vor allem während der anstrengenden Zeit am Schluss der Arbeit. Und „Vielmals Entschuldigung“ für lästige Unterbrüche während Biketouren oder Wanderungen, wo ich jeweils noch schnell einen „schönen Bach“ oder dieses ominöse „Geschiebe“ fotografieren musste...

Danken möchte ich zum Schluss ganz herzlich meinen Eltern **Hans und Christine Gertsch-Fankhauser**, die mich in all diesen Jahren unterstützt haben. Sie haben bei uns Kindern das Interesse für die Natur von klein an geweckt und gefördert, sei dies beim „Kristalle“-Suchen zwischen dem Schilthorn und der Rotstockhütte, beim Bächli-Stauen in der Trachsellauenen oder beim Steinbockhörner-Suchen in den frisch ausgeaperten Lawinenzügen des Hinteren Lauterbrunnentals.

Stalden, im Februar 2009

Eva Gertsch

Zusammenfassung

Murgänge und Hochwasser mit Geschiebetrieb führen auf Schwemmkegeln von steilen Wildbächen immer wieder zu grossen Sachschäden, in seltenen Fällen leider auch zu Verletzten oder Todesopfern. Effektive und effiziente Massnahmen zur Verringerung der von Wildbächen ausgehenden Risiken basieren auf Seiten des Gefahrenprozesses auf einer umfassenden Gefahrenbeurteilung. Dabei sind Fachleute in ihrer täglichen Arbeit immer wieder mit der Herausforderung konfrontiert, quantitative Abschätzungen potenzieller Geschiebefrachten zu erstellen. Der Geschiebehaushalt in Wildbachsystemen ist durch seine Vielfalt an relevanten Einflussfaktoren aber sehr komplex und die daran beteiligten Prozesse sind bisher nicht im Detail verstanden. Messreihen zu Geschiebefrachten, aus denen Erfahrungswerte abgeleitet werden könnten, befinden sich erst im Aufbau. Abschätzungen von Geschiebefrachten gestalten sich deshalb schwierig. Den Fachleuten stehen heute zwar verschiedene Abschätzverfahren zur Verfügung, einige vereinfachen das komplexe Prozessgefüge aber zu stark und sind dadurch zu ungenau, andere Methoden sind sehr detailliert und benötigen viel Zeit. Allen gemeinsam ist, dass nur die wenigsten auf Basis umfassender Ereignisanalysen entwickelt worden sind. Bei der Anwendung aller Abschätzmethoden an einem Wildbach treten meist extreme Streuungen der Ergebnisse auf, was die Unsicherheiten im Umgang mit Geschiebeabschätzungen verdeutlicht.

Das Ziel dieser Arbeit war, durch die Analyse von 58 in den Schweizer Alpen abgelaufenen Grossereignissen mit Wiederkehrperioden ≥ 100 Jahren einen Beitrag zu einem besseren Prozessverständnis des Geschiebehaushalts steiler Wildbacheinzugsgebiete zu liefern. Diese gewonnenen neuen Erkenntnissen bildeten die Grundlage für die anschliessende Entwicklung eines neuen Geschiebeabschätzverfahrens für die Praxis.

Bei den Analysen der 58 Grossereignisse wurden die abgelaufenen Geschiebeprozesse und Geschiebebilanzen in 352 Gerinneabschnitten (inkl. angrenzende Hänge) hinsichtlich der Identifikation relevanter Einflussfaktoren untersucht. Es zeigte sich, dass die Geschiebeprozesse in einem Gerinneabschnitt von zahlreichen Einflussfaktoren gesteuert werden. Diese können in 3 Gruppen unterteilt werden, welche 3 verschiedenen Beurteilungs-Blickwinkeln entsprechen.

- Erstens entscheiden „lokale Standortfaktoren“ in einem Gerinneabschnitt über zu erwartende Geschiebeprozesse. Dazu gehören die Einzugsgebietsfläche oberhalb des Gerinneabschnitts, die mittlere Gerinneneigung und das Lockermaterialangebot.
- Zweitens wird die Geschiebemobilisierung im Gerinneabschnitt aber auch durch erosionsfördernde und erosionshemmende Einflussfaktoren aus oberhalb liegenden Gerinneabschnitten, den „Bedingungen oberhalb“ beeinflusst. So führen z. B. oberhalb liegende, steile Gerinneabschnitte, in denen freie Transportkapazität herrscht, durch grosse Abflussgeschwindigkeiten zu erhöhter verfügbarer Energie. Diese kann im unterhalb liegenden Gerinneabschnitt eine verstärkte Erosionstendenz bewirken. Erosionshemmend im Gerinneabschnitt wirken hingegen zum Beispiel starke Verflachungen gegenüber den Gefällen in oberhalb liegenden Gerinneabschnitten.
- Drittens kann es zu so genannten „Negativfaktoren“ kommen. Negativfaktoren sind spezielle Konstellationen oder Prozesse, welche im Ereignisfall meistens zur Auslösung von speziell grossen Murgängen führen und im Gesamtsystem als Schwellenprozesse wirken (z. B. Murganganrisse im auftauenden Permafrostgebiet, Ausbrüche von Flutwellen oder Durchbrüche von Verklausungen). Durch Negativfaktoren kann sich das Ereignisausmass nicht nur im Gerinneabschnitt des Ausbruchs, sondern auch in den unterhalb liegenden Gerinneabschnitten und dadurch im gesamten Wildbachsystem um Grössenordnungen erhöhen.

Das kombinierte Wirken aller Einflussfaktoren dieser 3 Beurteilungs-Blickwinkel entscheidet in jedem einzelnen Gerinneabschnitt eines Wildbachsystems über die grundsätzliche Disposition für mögliche Prozessarten und –abläufe sowie über das dabei mobilisierte, verlagerte oder abgelagerte Geschiebevolumen. Dabei ist jeder Gerinneabschnitt als Individuum zu betrachten, auf den während einem Grossereignis eine einmalige Einflussfaktor-Kombination einwirkt.

Bei den detaillierten qualitativen und quantitativen Datenanalysen der 352 Gerinneabschnitte wurden Schwellenwerte und Grenzwerte identifiziert, welche darüber Aufschluss geben, wo und unter welchen Einflussfaktor-Kombinationen, welche Geschiebeprozesse in welchem Ausmass möglich sind. Darauf basierend wurde für die Praxis ein empirisches Geschiebeabschätzverfahren für Grossereignissen entwickelt. Spezialitäten des Verfahrens sind u. a.:

- die wissenschaftlich fundierte und umfassende Kalibrierung und Validierung an einer sehr grossen Anzahl real abgelaufener Ereignisse und zusätzlich an Abschätzungen
- das systembasierte und stark prozessorientierte Beurteilungs-Vorgehen, bei dem alle auf den Geschiebehaushalt in einem Gerinneabschnitt einwirkenden relevanten Einflussfaktor-Kombinationen des Gesamtsystems sowohl räumlich als auch funktional vernetzt und dadurch in Zusammenhängen denkend berücksichtigt werden

Das Geschiebeabschätzverfahren ist anwendbar in steilen Wildbachsystemen mit einer Einzugsgebietsfläche $< 10 \text{ km}^2$ und ermöglicht es Fachleuten, in kurzer Zeit quantitative Berechnungen von Geschiebefrachten durchzuführen. Grundlage des Verfahrens bilden digitale Inputdaten zur Topographie, Geologie und Bodenbedeckung, welche mittels GIS extrahiert und aufbereitet werden können. Diese digitalen Daten können zusätzlich mit gezielten Feldaufnahmen ergänzt werden. Dies erfordert einen grösseren Zeitaufwand bei der Anwendung, die Geschiebeabschätzungen erzielen dafür eine bessere Aussagegenauigkeit. Nachdem die nötigen Inputparameter extrahiert sind, werden vom Experten verschiedene denkbare Ereignisszenarien festgelegt. Diese können anschliessend mit Hilfe einer Hang- und einer Gerinne-Beurteilungsmatrix auf quantitativer Basis durchgerechnet werden. Dabei werden unter Berücksichtigung der relevanten Einflussfaktoren-Kombinationen Geschiebebilanzen in einzelnen, homogenen Gerinneabschnitten sowie die gesamte Geschiebefracht am Kegelhals berechnet. Grosse Teile des Geschiebeabschätzverfahrens wurden in Excel automatisiert. Dies ermöglicht eine rasche und effiziente Bearbeitung für die Anwendung in der Praxis.

Um das Geschiebeabschätzverfahren zu testen, wurden die Geschiebeprozesse von 20 real abgelaufenen Grossereignissen simuliert und die Ergebnisse mit den tatsächlichen Geschiebefrachten verglichen. Zudem wurden mit dem Abschätzverfahren verschiedene Szenarien von Grossereignissen in 23 Wildbacheinzugsgebieten durchgerechnet. Die dabei berechneten Geschiebefrachten wurden anschliessend mit Abschätzungen verglichen, welche im Rahmen von Gefahrenkartierungen oder Integralprojekten erstellt wurden. Diese Tests haben gezeigt, dass mit dem Geschiebeabschätzverfahren gute Resultate erzielt werden können. Zudem konnten sensible Faktoren identifiziert und der Anwendungsbereich des Geschiebeabschätzverfahrens eingegrenzt werden. Dadurch wurden Angaben zur Güte, Stärken und Schwächen des Geschiebeabschätzverfahrens transparent und offen dargelegt.

Als Endprodukt dieser Arbeit liegen somit nicht nur neue Erkenntnisse zum Prozessverständnis des Geschiebehaushalts in steilen Wildbacheinzugsgebieten vor, sondern erfolgte durch die Entwicklung eines systematischen, prozessorientierten und pragmatischen Geschiebeabschätzverfahrens auch eine vollumfängliche Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Praxis.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT UND DANK	I
ZUSAMMENFASSUNG	V
INHALTSVERZEICHNIS	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	XIII
TABELLENVERZEICHNIS	XVII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XIX
1 ZIELSETZUNG UND GLIEDERUNG DER ARBEIT	1
1.1 ZIELSETZUNG	2
1.1.1 <i>Übergeordnete Zielsetzung</i>	2
1.1.2 <i>Konkrete Zielsetzung</i>	2
1.2 GLIEDERUNG DER ARBEIT	3
1.3 FACTSHEETS ZU DEN UNTERSUCHTEN WILDBACHEINZUGSGEBIETEN	3
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	4
2.1 BEGRIFFE UND DEFINITIONEN	4
2.1.1 <i>Wildbach</i>	4
2.1.2 <i>Geschiebe</i>	4
2.1.3 <i>Grossereignis</i>	5
2.2 KOMPONENTEN EINES WILDBACHSYSTEMS	5
2.2.1 <i>Räumliche Komponenten</i>	6
2.2.2 <i>Funktionale Komponenten</i>	6
2.3 GESCHIEBEPROZESSE IM EINZUGSGEBIET VON WILDBACHSYSTEMEN	7
2.3.1 <i>Geschiebeaufbereitung</i>	7
2.3.2 <i>Geschiebelieferung Hang – Gerinne</i>	7
2.3.3 <i>Geschiebemobilisierung im Gerinne</i>	9
2.3.4 <i>Geschiebetransport im Gerinne</i>	10
2.3.5 <i>Geschiebeumlagerung und –ablagerung</i>	13
2.4 DAS KONZEPT DER DISPOSITION	13
2.5 AUSGEWÄHLTE GESCHIEBE-ABSCHÄTZVERFAHREN	15
2.5.1 <i>Wildbach-Klassifikationen</i>	15

2.5.2	<i>Einfache, empirische Abschätzverfahren</i>	16
2.5.3	<i>Abschätzverfahren mit Feldarbeit</i>	19
2.5.4	<i>GIS-basierte Abschätzverfahren</i>	22
2.5.5	<i>Physikalische Abschätzformeln für Geschiebetransportraten</i>	23
2.5.6	<i>Zusammenfassung der bestehenden Verfahren und Fazit für die Praxis</i>	24
3	METHODIK	28
3.1	ÜBERBLICK	28
3.2	AUSWAHL DER STICHPROBE	29
3.3	DATEN ZU DEN GROSSEREIGNISSEN IN DEN ANALYSEGEBIETEN	31
3.3.1	<i>Niederschlagsanalysen</i>	31
3.3.2	<i>Abschätzungen der Hochwasserabflüsse</i>	32
3.3.3	<i>Geschiebebilanzen und Geschiebetransportprozesse</i>	32
3.4	DIGITALE DATEN ZUM NATURRAUM IN DEN ANALYSEGEBIETEN	39
3.4.1	<i>Bestehende Datengrundlagen und ergänzende Datenerhebungen</i>	39
3.4.2	<i>Datenaufbereitung</i>	41
3.5	ANALYSEN ZUM EINFLUSS DES NATURRAUMS AUF DIE GROSSEREIGNISSE	42
3.6	ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG DES GESCHIEBEABSCHÄTZVERFAHRENS	43
3.6.1	<i>Entwicklung</i>	43
3.6.2	<i>Validierung und Sensitivitätsanalyse</i>	44
4	UNTERSUCHUNGSGEBIETE	45
4.1	STICHPROBE	45
4.2	ÜBERBLICK NATURRAUM	51
4.2.1	<i>Einzugsgebietsgrösse</i>	51
4.2.2	<i>Mittlere Hangneigung</i>	51
4.2.3	<i>Mittlere Gebietshöhe</i>	52
4.2.4	<i>Hauptgeologie</i>	53
4.3	ÜBERBLICK GROSSEREIGNISSE	53
4.3.1	<i>Zeitlicher und saisonaler Überblick</i>	53
4.3.2	<i>Hydrologischer Auslöser</i>	55
4.3.3	<i>Transportprozess</i>	56
5	BLICKWINKEL BEI DER SYSTEMBASIERTE WILDBACHBEURTEILUNG	57
5.1	ZU DEN BEGRIFFEN KOMPLEXITÄT UND SYSTEM	57
5.2	STRUKTUR DES WILDBACHSYSTEMS IN DIESER ARBEIT	57
5.3	STABILITÄT EINES WILDBACHSYSTEMS	58

5.4	BLICKWINKEL FÜR DAS VERSTÄNDNIS DES GESCHIEBEHAUSHALTS IM SYSTEM	59
5.4.1	<i>Eigenschaften des Systemelements – lokale Standortfaktoren</i>	59
5.4.2	<i>Wechselwirkungen der Systemelemente - Bedingungen oberhalb</i>	60
5.4.3	<i>Schwellenprozesse – Negativfaktoren</i>	61
5.4.4	<i>Zu berücksichtigende Blickwinkel</i>	62
6	EINFLUSSFAKTOREN AUF DEN GESCHIEBEHAUSHALT	63
6.1	EINFLUSSFAKTOREN DES BLICKWINKELS „LOKALE STANDORTFAKTOREN“	63
6.1.1	<i>Einflussfaktoren im Hang</i>	63
6.1.2	<i>Einflussfaktoren im Gerinne</i>	65
6.2	EINFLUSSFAKTOREN DES BLICKWINKELS „BEDINGUNGEN OBERHALB“	67
6.2.1	<i>Transportprozess oberhalb</i>	67
6.2.2	<i>Gerinneneigungsänderung</i>	67
6.2.3	<i>Lokaler und akkumulierter Energie-Index</i>	68
6.2.4	<i>Hanginput bis und mit dem zu beurteilenden Gerinneabschnitt</i>	71
6.2.5	<i>Einmündung von Seitengerinnen</i>	72
6.3	EINFLUSSFAKTOREN DES BLICKWINKELS „NEGATIVFAKTOREN“	73
6.3.1	<i>Geschiebebeeinflussende Negativfaktoren</i>	74
6.3.2	<i>Abflussbeeinflussende Negativfaktoren</i>	78
6.4	KOMBINATION ALLER EINFLUSSFAKTOREN	82
7	GESCHIEBELIEFERUNG VOM HANG IN DAS GERINNE	83
7.1	FLUVIALE EROSION	84
7.2	RUTSCHUNGSPROZESSE	85
7.2.1	<i>Auslösepunkte von Rutschungen</i>	85
7.2.2	<i>Gelieferte Volumina</i>	88
7.2.3	<i>Mobilisierung im Gerinne</i>	91
8	GESCHIEBEVERLAGERUNG IM GERINNE	98
8.1	GESCHIEBEVERLAGERUNG IM GERINNE DURCH MURGANSTRANSPORT	99
8.1.1	<i>Geschiebemobilisierung durch Gerinneerosion</i>	99
8.1.2	<i>Geschiebeumlagerung und -ablagerung</i>	116
8.2	GESCHIEBEVERLAGERUNG IM GERINNE DURCH GESCHIEBETRIEB	120
8.2.1	<i>Geschiebemobilisierung durch Gerinneerosion</i>	120
8.2.2	<i>Geschiebeumlagerung und -ablagerung</i>	127
9	GESCHIEBEAUSSTRAG	131

10	ENTWICKLUNG DES GESCHIEBEABSCHÄTZVERFAHRENS	135
10.1	TECHNISCHE DATEN	135
10.1.1	<i>Zielpublikum.....</i>	135
10.1.2	<i>Anwendungsbereich</i>	135
10.1.3	<i>Entwicklung und Validierung.....</i>	135
10.1.4	<i>Aussagebereich und Aussagegenauigkeit</i>	136
10.1.5	<i>Benötigte Zeit zur Durchführung.....</i>	137
10.1.6	<i>Erforderliche Software</i>	137
10.2	AUFBAU UND STRUKTUR	137
10.3	GRUNDLAGENBESCHAFFUNG	138
10.4	ABGRENZUNG VON GERINNEABSCHNITTEN	139
10.4.1	<i>Abgrenzung der Einzugsgebietsfläche</i>	139
10.4.2	<i>Festlegen pot. Erstabschnitts-Startpunkte und Abgrenzung des Gerinnesystems</i>	139
10.4.3	<i>Abgrenzung der einzelnen Gerinneabschnitte</i>	140
10.5	EXTRAHIEREN DER INPUTPARAMETER.....	140
10.6	SZENARIENBILDUNG.....	141
10.7	EINGABE DER INPUTPARAMETER	141
10.8	BEURTEILUNG DER HANGPROZESSE MITTELS HANG-BEURTEILUNGSMATRIX	143
10.8.1	<i>Bestimmen der aus dem Hang gelieferten Kubatur</i>	143
10.8.2	<i>Beurteilung der Mobilisierung im Gerinne mittels Hang-Beurteilungsmatrix</i>	144
10.8.3	<i>Durchführung im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren</i>	150
10.9	BEURTEILUNG DER GERINNEPROZESSE MITTELS GERINNE-BEURTEILUNGSMATRIX.....	153
10.9.1	<i>Überblick zum Aufbau der Beurteilungsmatrix</i>	153
10.9.2	<i>Beurteilung der lokalen Standortfaktoren (Zeilen A bis C)</i>	155
10.9.3	<i>Beurteilung Transportprozess, Funktion und Lieferungspotenzial (Zeilen D bis J).....</i>	156
10.9.4	<i>Beurteilung der Einflussfaktoren-Kombination (Zeile K).....</i>	168
10.9.5	<i>Quantifizierung.....</i>	171
10.10	FAZIT UND ABSCHÄTZUNG DER GESAMTEN GESCHIEBEFRACHT	174
10.11	AUTOMATISIERTES GESCHIEBEABSCHÄTZVERFAHREN	175
11	VALIDIERUNG UND SENSITIVITÄTSANALYSE	176
11.1	VALIDIERUNG AN ABGELAUFENEN GROSSEREIGNISSEN – STUFE 1.....	176
11.2	VALIDIERUNG AN GESCHIEBE-ABSCHÄTZUNGEN – STUFE 2.....	177
11.2.1	<i>Vergleich mit gleichen Szenarien</i>	180
11.2.2	<i>Vergleich mit unbekanntem Szenarien.....</i>	181
11.2.3	<i>Vergleich mit unbekanntem Szenarien und unbekanntem Jährlichkeiten.....</i>	181

11.2.4	<i>Steinibach, Flühli, LU</i>	181
11.3	SENSIBLE FAKTOREN UND FAZIT ZUR ANWENDBARKEIT	182
12	SYNTHESE UND AUSBLICK	184
12.1	ÜBERBLICK	184
12.2	ERKENNTNISSE ZU EINEM BESSEREN PROZESSVERSTÄNDNIS	186
12.2.1	<i>Blickwinkel und relevante Einflussfaktoren auf die Geschiebeprozesse</i>	186
12.2.2	<i>Einfluss auf die Geschiebeprozesse</i>	188
12.3	ENTWICKLUNG DES GESCHIEBEABSCHÄTZVERFAHRENS	191
12.4	VALIDIERUNG UND SENSITIVITÄTSANALYSE DES GESCHIEBEABSCHÄTZVERFAHRENS	192
12.5	SPEZIALITÄT DES GESCHIEBEABSCHÄTZVERFAHRENS	193
12.6	AUSBLICK	194
13	LITERATURVERZEICHNIS	198
13.1	ÖFFENTLICH ZUGÄNLICHE DOKUMENTE	198
13.2	DIGITALE GRUNDLAGENDATEN	202
13.3	NICHT PUBLIZIERTE ODER AUF ANFRAGE ERHÄLTICHE LITERATUR	203

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1-1: Geschiebeablagerungen auf dem Schwemmkegel des Schwendibachs, Grindelwald, August 2005
- Abb. 2-1: Räumliche und funktionale Komponenten eines Wildbachsystems
- Abb. 2-2: Vereinfachtes Prozesssystem für Wildbäche (verändert nach Liener 2000)
- Abb. 2-3: Zusammenspiel von Disposition und auslösendem Ereignis (verändert nach Gamma 2000)
- Abb. 2-4: Entscheidungsbaum zur Erstbeurteilung (Spreafico et al. 1996)
- Abb. 2-5: Spezifische Feststofffracht eines grossen Wildbachereignisses in Abhängigkeit von der Geologie und der Einzugsgebietsgrösse (Spreafico et al. 1996)
- Abb. 2-6: Verfahren zur Abschätzung der Feststofffracht mit Hilfe eines GIS (Geo7 1997)
- Abb. 2-7: Resultate der vergleichenden Anwendung von Geschiebeabschätzverfahren im Steinbach LU (eigene Darstellung nach Zimmermann und Lehmann 1999)
- Abb. 3-1: Überblick Methodik
- Abb. 3-2: Volumenbilanz berechnet durch einen Höhenmodellvergleich vor und nach dem Grossereignis im Rotlauibach (4), © 2008 swisstopo (JD082795), (Eigene Darstellung, Datenquelle: Flotron AG)
- Abb. 3-3: Qualitativer Fotovergleich vor und nach dem Grossereignis im Rote Bach (6-8) vom 4.8.2004
- Abb. 3-4: Deutliche Erosionsspuren im Gelände links: Flachgründige Translationsrutschung im Rotlauibach (4-7) (Foto: Flotron AG) rechts: Tiefen- und Seitenerosion im Gletscherbach des Vadret da l'Alp Ota (21-4)
- Abb. 3-5: Deutliche Spuren von Murgangaktivität: Grosse, gerundete Blöcke oder Levées links: Grosser, gerundeter Block auf dem Schwemmkegel des Fangtobels (32) rechts: Levées auf dem Schwemmkegel des Alpenbachs (18)
- Abb. 3-6: Ablagerungskubaturen als Plausibilisierungswerte für abgeschätzte Geschiebefrachten links: Gefüllter Geschiebesammler im Eistlenbach (83) rechts: Ablagerungen auf dem Schwemmkegel des Schwendibachs (3)
- Abb. 3-7: Extremwertstatistik am Beispiel der Rhone in Sion (BWG 2001)
- Abb. 4-1: Lage und Nummerierung der Analysegebiete (blau), Ereignis-Validierungsgebiete (orange) und Abschätzungs-Validierungsgebiete (violett)
- Abb. 4-2: Verteilung der Einzugsgebietsgrössen der Untersuchungsgebiete
- Abb. 4-3: Verteilung der mittleren Hangneigungen in den Untersuchungsgebieten
- Abb. 4-4: Verteilung der mittleren Gebietshöhen in den Untersuchungsgebieten
- Abb. 4-5: Verteilung der Hauptgeologien in den Untersuchungsgebieten
- Abb. 4-6: Zeitliche Verteilung der untersuchten Grossereignisse
- Abb. 4-7: Saisonale Verteilung der untersuchten Grossereignisse
- Abb. 4-8: Hydrologischer Auslöser der Analyseebäche
- Abb. 4-9: Hydrologischer Auslöser der Grossereignisse in den Ereignis-Validierungsbächen
- Abb. 4-10: Vorherrschender Transportprozess bei den untersuchten Grossereignissen
- Abb. 5-1: Schematische Darstellung des Wildbachsystems mit Systemgrenze und Systemelementen
- Abb. 5-2: Betrachtung der „lokalen Standortfaktoren“ mit Lupe
- Abb. 5-3: Betrachtung der „Bedingungen oberhalb“ mit Feldstecher
- Abb. 5-4: Betrachtung von „explosiven“ Negativfaktoren
- Abb. 6-1: Klassierung der Rutschungs-Einmündungswinkel
- Abb. 6-2: Verhältnis der Gerinneneigung zweier Gerinneabschnitte im Längensprofil betrachtet
- Abb. 6-3: Schematisches Beispiel zur Berechnung der akkumulierten Energie –Index $E-I_{akk}$
- Abb. 6-4: Blick vom Gegenhang (links) und Volumenbilanz im Rote Bach (6-9/6-10) mittels Fotogrammetrie (Zingg 2007)
- Abb. 6-5: Mündung zweier Gerinne im Holdenbach und anschliessende verstärkte Erosion im Folgeabschnitt (45-9)
- Abb. 6-6: Überblick über die Geschiebe- und Abflussbeeinflussenden Negativfaktoren
- Abb. 6-7: Murganganriss in der Bastionsmoräne im Rotlauibach (4-3) (Foto: Flotron AG)
- Abb. 6-8: Murganganriss im Permafrostgebiet im Gebiet Ribenen unterhalb des Riesenstocks (UR) (Foto: Geotest AG und belop gmbh)
- Abb. 6-9: Mit Lockermaterial gefülltes Felscouloir im Tüfeltaal (48-3)
- Abb. 6-10: Grossrutschung im Gangbach (49-1)
- Abb. 6-11: Blick in das Hohlräumensystem des subglazialen Sees im Rote Bach (6-1) (Foto: S. Zingg)
- Abb. 6-12: Konzentrierter Austritt von Kluftwasser aus der Löcherfluh im Dürrbach (70) (Foto: Kantonspolizei Obwalden)
- Abb. 6-13: Murgangbildung und Stufe (16 m) nach Einmündung mehrere Gerinne im Rotlauibach (4-4) (Foto: Flotron AG)
- Abb. 6-14: Durchgebrochene Verklauung verursacht durch eine Grossrutschung im Haldibach (29)
- Abb. 7-1: Vereinfachtes Prozesssystem Wildbach mit Fokus auf die Geschiebelieferung aus dem Hang (verändert nach Liener 2000)
- Abb. 7-2: Runsenerosion: links: Ri di Bedretto (40-6); rechts: Alpenbach (18-3)
- Abb. 7-3: Einfluss der Hangneigung auf die Häufigkeit der Auslösepunkte (verändert nach Sterchi 2007)
- Abb. 7-4: Einfluss der Lithologie auf die Häufigkeit der Auslösepunkte (verändert nach Sterchi 2007)

- Abb. 7-5: Einfluss der Bodenbedeckung auf die Häufigkeit der Auslösepunkte (verändert nach Sterchi 2007)
- Abb. 7-6: Distanz der Rutschungs-Auslösepunkte zum Gerinne (verändert nach Sterchi 2007)
- Abb. 7-7: Häufigkeitsdiagramm der Rutschungskubaturen (verändert nach Sterchi 2007)
- Abb. 7-8: Gelieferte Rutschungsvolumina in Abhängigkeit von der Hangneigung am Auslösepunkt
- Abb. 7-9: Geschiebelieferung aus dem Hang pro Gerinneabschnitt in Abhängigkeit vom Anteil der potenziellen Auslösefläche von Rutschungen an der Gesamtfläche 100 m entfernt von der Gerinneachse H_{pot}/H_{100}
- Abb. 7-10: Geschiebelieferung aus dem Hang pro Gerinneabschnitt in Abhängigkeit vom Anteil der Felsflächen an der Gesamtfläche 100 m entfernt von der Gerinneachse H_f/H_{100}
- Abb. 7-11: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang in Abhängigkeit von den gelieferten Geschiebevolumina
- Abb. 7-12: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche oberhalb des Gerinneabschnitts und von der mittleren Gerinneneigung im Gerinneabschnitts
- Abb. 7-13: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang bei gelieferten Volumina von 0-1'000 m³ in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche, Gerinneneigung, vom Transportprozess, abflussbeeinflussenden Negativfaktoren und erhöhten $E-I_{akk}$ Werten
- Abb. 7-14: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang bei gelieferten Volumina zwischen 1'000-5'000 m³ in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche, Gerinneneigung, vom Transportprozess, abflussbeeinflussenden Negativfaktoren und erhöhten $E-I_{akk}$ Werten
- Abb. 7-15: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang bei gelieferten Volumina zwischen 5'000-20'000 m³ in Abhängigkeit vom Mündungswinkel
- Abb. 7-16: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang bei gelieferten Volumina von >20'000 m³ in Abhängigkeit vom Mündungswinkel
- Abb. 7-17: Mobilisierungsfaktor der teilmobilisierten Rutschungen im Gerinne in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche oberhalb
- Abb. 7-18: Grossrutschung im Acherlibach (34-2) (Foto: belop gmbh)
- Abb. 8-1: Vereinfachtes Prozesssystem Wildbach mit Fokus auf die Geschiebemobilisierung im Gerinne (verändert nach Liener, 2000)
- Abb. 8-2: Auslösungsmechanismen von Murgängen: links: Sohlenverflüssigung im Tanzhubelbächli (7-1) (Foto: S. Zingg) rechts: Fortsetzung einer Hangmure im Gerinne im Schwendibach (3-1) (Foto: Flotron AG)
- Abb. 8-3: Prozentuale Anteile der verschiedenen Murgang-Auslösemechanismen in den Analysebächen
- Abb. 8-4: Charakteristik von Gerinneanrissen bezüglich der Art der Auslösemechanismen (Zimmermann et al. 1997)
- Abb. 8-5: Grenzgefälle J_{start} [%] zur Auslösung von Murgängen durch verschiedene Auslösemechanismen in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche oberhalb A_{EG} [km²]
- Abb. 8-6: Häufigkeitsverteilung verschiedener Einflussfaktoren an den Erosionsleistungsklassen der Gerinneabschnitte mit Gerinneerosion durch Murgangtransport
- Abb. 8-7: Anzahl Gerinneabschnitte mit limitiertem oder unlimitiertem Lockermaterialangebot pro Erosionsleistungsklasse
- Abb. 8-8: Erosionsleistungen von durch Negativfaktoren beeinflussten Gerinneabschnitten in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche
- Abb. 8-9: Erosionsleistungen in durch verschiedenste Negativfaktoren direkt und indirekt beeinflussten Gerinneabschnitten in Abhängigkeit von der Gerinneneigung
- Abb. 8-10: Grosse Erosionsleistungen im Rotlauibach (4-7) (Foto: Flotron AG)
- Abb. 8-11: Prozentualer Anteil und absolute Anzahl Gerinneabschnitte mit limitiertem und unlimitiertem Lockermaterialangebot pro Erosionsleistungsklasse
- Abb. 8-12: Vergleich zwischen kleinen und mittleren Erosionsleistungen durch Murgangtransport in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche, akkumuliertem Energie-Index und Einmündungen bedeutender Seitengerinne
- Abb. 8-13: Prozentualer Anteil und absolute Anzahl der Gerinneabschnitte der Erosionsleistungsklassen 1-5 m³/m resp. 5-20 m³/m in Abhängigkeit vom $E-I_{akk}$ oder von Einmündungen bedeutender Seitengerinne
- Abb. 8-14: Vergleich zwischen kleinen und mittleren Erosionsleistungen durch Murgangtransport in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche, akkumuliertem Energie-Index und Einmündungen bedeutender Seitengerinne
- Abb. 8-15: Erosionsleistung in Erstabschnitten in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung
- Abb. 8-16: Murgangablagerungen im Minstigerbach (55) und (77)
- Abb. 8-17: Funktion der Unterlieger-Abschnitte mit Murgangtransport oder Murgangstop in Abhängigkeit von der mittleren Gerinneneigung J_{GA} und dem Verhältnis J_{GA}/J_{GAob}
- Abb. 8-18: Detaillierte Ansicht der Funktion der Gerinneabschnitte mit Murgangtransport in Abhängigkeit von der Gerinneneigung im Gerinneabschnitt (J_{GA}) und dem Verhältnis zu jener im oberen Gerinneabschnitt (J_{GA}/J_{GAob})
- Abb. 8-19: Zusammenhang zwischen Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung bei der Geschiebemobilisierung in Erstabschnitten
- Abb. 8-20: Verteilung der Einflussfaktoren Lockermaterialangebot, Einzugsgebietsfläche, Gerinneneigung, Negativfaktoren, J_{GA}/J_{GAob} , $E-I_{akk}$ und Einmündung von Seitengerinnen und Hanginput oberhalb an den Erosionsleistungsklassen der Gerinneabschnitte mit Gerinneerosion durch Geschiebetrieb
- Abb. 8-21: Erosionsleistungen durch Geschiebetrieb in Gerinneabschnitten im unlimitierten Lockermaterial in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgrösse und von der mittleren Gerinneneigung
- Abb. 8-22: Erosionsleistungen durch Geschiebetrieb in Gerinneabschnitten im unlimitierten Lockermaterial mit und ohne Negativfaktoren in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgrösse, von der mittleren Gerinneneigung
- Abb. 8-23: Erosionsleistungen durch Geschiebetrieb in Gerinneabschnitten im unlimitierten Lockermaterial mit und ohne erosionsfördernde Faktoren in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgrösse, von der mittleren Gerinneneigung

- Abb. 8-24: Erosionsleistungen durch Geschiebetrieb in Gerinneabschnitten im unlimitierten Lockermaterial mit oder ohne erosionshemmende Faktoren in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgrösse, von der mittleren Gerinneneigung
- Abb. 8-25: Funktion der Gerinneabschnitte mit Geschiebetrieb in Abhängigkeit von der Gerinneneigung im Gerinneabschnitt (J_{GA}) und dem Verhältnis zu jener im oberen Gerinneabschnitt (J_{GA}/J_{GAob})
- Abb. 8-26: Detaillierte Ansicht der Funktion der Gerinneabschnitte mit Geschiebetrieb in Abhängigkeit von der Gerinneneigung im Gerinneabschnitt (J_{GA}) und dem Verhältnis zu jener im oberen Gerinneabschnitt (J_{GA}/J_{GAob})
- Abb. 9-1: Vereinfachtes Prozesssystem Wildbach mit Fokus auf den Feststoffaustrag (verändert nach Liener 2000)
- Abb. 9-2: Spezifische Geschiebefrachten der Analysebäche in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche, Negativfaktoren mit und ohne bedeutende Ablagerungen
- Abb. 9-3: Torrent de Saxé (52): Blick vom Gegenhang (oberes Foto) und Blick von oben (unteres Foto)
- Abb. 10-1: Aussagegenauigkeit des Geschiebeabschätzverfahrens in Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad der Inputparameter
- Abb. 10-2: Ablaufschema des Geschiebeabschätzverfahrens
- Abb. 10-3: Tabellenblätter des Geschiebeabschätzverfahrens in Excel
- Abb. 10-4: Eingabemaske im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-5: Maximal möglicher Geschiebeinput durch Rutschungen und Runsen in einen Gerinneabschnitt in Abhängigkeit von den Verhältnissen H_{pot}/H_{100} und H_F/H_{100}
- Abb. 10-6: Hang-Beurteilungsmatrix
- Abb. 10-7: Qualitative Gewichtung verschiedener Einflussfaktoren auf die Mobilisierung von Geschiebe aus dem Hang im Gerinne in Abhängigkeit von der in einen Gerinneabschnitt gelieferten Kubatur
- Abb. 10-8: Beispiel einer Beurteilung der Mobilisierung von Hanginput im Gerinne
- Abb. 10-9: Tabellenblatt zu den Hangprozessen
- Abb. 10-10: Eingabe der Kubatur aus dem Hang im automatisierten Verfahren
- Abb. 10-11: Ergebnis der automatischen Grobabschätzung und Eingaben der Feinabschätzung
- Abb. 10-12: Fazit der Feinabschätzung tabellarisch
- Abb. 10-13: Grafik der Hangbeurteilungsmatrix im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-14: Gerinne-Beurteilungsmatrix
- Abb. 10-15: Funktion und Quantifizierung am Ende der Beurteilung
- Abb. 10-16: Zeilen A bis C in der Beurteilungsmatrix
- Abb. 10-17: Tabellenblatt zu den Gerinneprozessen
- Abb. 10-18: Automatischer Eintrag der 3 lokalen Standortfaktoren im automatisierten Verfahren
- Abb. 10-19: Automatische Darstellung in der „Grafik_Gerinne“
- Abb. 10-20: Entscheidungsbaum als Basis zur Auswahl der relevanten Beurteilungskriterien (schwarz: Beurteilungskriterien des Blocks „Transportprozess“, grau: Beurteilungskriterien des Blocks „Funktion und Quantifizierung Lieferungspotenzial“)
- Abb. 10-21: Zeile D der Gerinne-Beurteilungsmatrix
- Abb. 10-22: Zeile D im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-23: Zeile E der Gerinne-Beurteilungsmatrix
- Abb. 10-24: Hilfstabellen E1 und E2 zur Beurteilung des Weitertransports von Murgängen
- Abb. 10-25: Zeile E im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-26: Zeile F der Gerinne-Beurteilungsmatrix
- Abb. 10-27: Zeile F im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-28: Zeile G in der Gerinne-Beurteilungsmatrix
- Abb. 10-29: Zeile G im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-30: Hilfstabelle zu Zeile H
- Abb. 10-31: Zeile H in der Gerinne-Beurteilungsmatrix
- Abb. 10-32: Zeile H im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-33: Zeile I in der Gerinne-Beurteilungsmatrix
- Abb. 10-34: Zeile I im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-35: Zeile J in der Gerinne-Beurteilungsmatrix
- Abb. 10-36: Zeile J im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-37: Hilfstabelle zur Definition der Limite aufgrund der Einflussfaktoren-Kombination
- Abb. 10-38: Verlauf der Beurteilungslinie in der Gerinne-Beurteilungsmatrix im Beispiel
- Abb. 10-39: Hilfstabelle zur Definition der Limite aufgrund der Einflussfaktoren-Kombination
- Abb. 10-40: Zeile K im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-41: Quantifizierung in Zeile L in der Gerinne-Beurteilungsmatrix
- Abb. 10-42: Quantifizierung im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-43: Grafische Darstellung der Gerinneprozesse im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-44: Tabellenblatt „Fazit“ im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 10-45: Fazit der Geschiebeabschätzung im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

- Abb. 11-1: Vergleich zwischen den tatsächlichen (blau) und den simulierten (rot) Geschiebefrachten der Ereignis-Validierungsgebiete und Angabe des Verhältnisses Simulation/tatsächlicher Wert
- Abb. 11-2: Beurteilung verschiedener Szenarien in den Abschätzungs-Validierungsbächen mittels Geschiebeabschätzverfahren. * = Vorgehensweise Schreibtisch-basiert, ohne * = Feld-ergänzt
- Abb. 11-3: Vergleich der Geschiebefrachten zwischen dem Geschiebeabschätzverfahren und Abschätzungen anlässlich von Gefahrenkartierungen in Abhängigkeit verschiedener Szenarien und Jährlichkeiten
- Abb. 11-4: Vergleich der Geschiebeabschätzungen im Steinibach (LU) nach Zimmermann und Lehmann (1999) und den berechneten Szenarien mit dem entwickelten Geschiebeabschätzverfahren
- Abb. 12-1: Überblick über Ziele (rot), Vorgehen/Ergebnisse (blau) und Produkte (orange) dieser Arbeit
- Abb. 12-2: Spuren eines Murgangs im Tanzhubelbächli (7)
- Abb. 12-3: Ein einziger, zufällig verteilter Baumstamm provozierte eine grössere Ablagerung im Schnellengraben in der Wasserlauri/Schatzlibach (Sarnen) während dem Ereignis im August 2005 (Foto: belop gmbh)

Tabellenverzeichnis

- Tab. 2-1: Anrisszonen von Murgängen (aus Fässler 2008 nach Zimmermann 1990)
- Tab. 2-2: Übersicht über die Zuweisung der Geologiefaktoren
- Tab. 2-3: Übersicht über die Zuweisung der Prozessfaktoren
- Tab. 2-4: Kalibrierung, Inputdaten, Zeitaufwand und Aussagekraft der ausgewählten Abschätzverfahren
- Tab. 3-1: Zweck, Quellen, Auswahlkriterien und Anzahl der Analyse- und Validierungsgebiete
- Tab. 3-2: Erhobene Parameter für die Geschiebebilanzen
- Tab. 3-3: Rasterdatensätze mit Informationen zu den Grossereignissen
- Tab. 3-4: Datenlayer im GIS zu den Naturräumlichen Bedingungen
- Tab. 4-1: Kennzahlen zu den Analysegebieten
- Tab. 4-2: Kennzahlen zu den Ereignis-Validierungsgebieten
- Tab. 4-3: Kennzahlen zu den Abschätzungs-Validierungsgebieten
- Tab. 5-1: Zu berücksichtigende Blickwinkel bei der Betrachtung der verschiedenen Systemelemente
- Tab. 6-1: Einflussfaktoren des Blickwinkels „Lokale Standortfaktoren“
- Tab. 6-2: Einflussfaktoren des Blickwinkels „Bedingungen oberhalb“
- Tab. 6-3: Berechnungsformeln für den lokalen Energie-Index $E-I_{GA}$
- Tab. 6-4: Negativfaktor „Bastionsmoräne“
- Tab. 6-5: Negativfaktor „Permafrost“
- Tab. 6-6: Negativfaktor „Ausräumung auf steilem, resistenteren Stauhorizont im Gerinne“
- Tab. 6-7: Negativfaktor „Grossrutschung“
- Tab. 6-8: Negativfaktor „Flutwelle“
- Tab. 6-9: Negativfaktor „Kluftwasser“
- Tab. 6-10: Negativfaktor „Mündung mehrerer Gerinne“
- Tab. 6-11: Negativfaktor „Verklausung“
- Tab. 7-1: Beobachtete Erosionsleistungen durch Runsenerosion
- Tab. 7-2: Klassifikation des Datensatzes „Lockermaterialangebot“
- Tab. 7-3: Mittelwerte der Rutschungs-Lieferungsvolumina aller Rutschungen $< 10'000 \text{ m}^3$ ausgelöst in der Primärflächenklasse „Wald“ und „Übriges“:
- Tab. 8-1: Entstehungsmechanismen der 74 Gerinneabschnitte mit Murgangauslösung
- Tab. 8-2: Durch Negativfaktoren unbeeinflusste Gerinneabschnitte mit grossen Erosionsleistungen
- Tab. 8-3: Kennzahlen der Gerinneabschnitte $J_{GA} < 15\%$ resp. $J_{GA} 15-30\%$ und $J_{GA}/J_{GAob} < 0.5$ mit Geschiebetrieb
- Tab. 8-4: Kennzahlen der Gerinneabschnitte $J_{GA} < 30\%$ und $J_{GA}/J_{GAob} < 1$ mit Geschiebetrieb
- Tab. 9-1: Spez. Geschiebefrachten, Negativfaktoren und bedeutende Ablagerungen in den Analyseebächen
- Tab. 10-1: Zu beschaffende Grundlagendaten in Abhängigkeit von der geplanten Vorgehensweise
- Tab. 11-1: Legende zu Abb. 11-3

Abkürzungsverzeichnis

3HG	Negativfaktor „Mündung mehrerer Gerinne“ (vgl. Kap. 6.3.2)
A	Funktion eines Gerinneabschnitts während einem Ereignis: Ablagerung
A_{EG}	Einzugsgebietsfläche oberhalb eines Gerinneabschnitts [km ²]
AS	Negativfaktor „Ausräumung auf steilem, resistenteren Stauhorizont im Gerinne“ (vgl. Kap. 6.3.1)
BM	Negativfaktor „Bastionsmoräne“ (vgl. Kap. 6.3.1)
DHM	Digitales Höhenmodell
E	Funktion eines Gerinneabschnitts während einem Ereignis: Erosion
E-I_{akk}	Akkumulierter Energie-Index in einem Gerinneabschnitt [-]. Die Berechnung erfolgt durch eine Aufsummierung der lokalen Energie-Indizes E-I _{GA} der oberhalb liegenden Gerinneabschnitte, wobei der E-I _{akk} nie negativ werden darf. Die genauen Berechnungsregeln zum E-I _{akk} sind in Kap. 6.2.3 ersichtlich.
E-I_{GA}	Lokaler Energie-Index in einem Gerinneabschnitt [-]. Die Berechnung des E-I _{GA} ist in Kap. 6.2.3 ersichtlich
EL	(Netto)-Erosionsleistung in einem Gerinneabschnitt [m ³ /m] (Kubik pro Laufmeter) oder Erosionsquerschnitt eines Gerinneabschnitts [m ²].
F	Kategorie der Lockermaterialangebots im Gerinne: Anstehender fester Fels
Fu	Funktion eines Gerinneabschnitts während einem Ereignis
FW	Negativfaktor „Flutwelle“ (vgl. Kap. 6.3.2)
GA	Gerinneabschnitt
GB_{GA}	Geschiebebilanz in einem Gerinneabschnitt [m ³]
GF_{GA}	Geschiebefracht bis und mit einem bestimmten Gerinneabschnitt. Summe aller Geschiebebilanzen GB _{GA} oberhalb und in einem betreffenden Gerinneabschnitt [m ³]
GF_{GAob}	Geschiebefracht bis oberhalb eines bestimmten Gerinneabschnitts. Summe aller Geschiebebilanzen GB _{GA} oberhalb eines betreffenden Gerinneabschnitts [m ³]
GIS	Geographisches Informations System
GR	Negativfaktor „Grossrutschung“ (vgl. Kap. 6.3.1)
GT	Fluvialer Geschiebetransport oder Geschiebetrieb

H₁₀₀	Gesamtfläche der in einen Gerinneabschnitt mündenden Seitenhänge mit einer maximalen Distanz zur Gerinneachse eines Gerinneabschnitts von 100 m [km ²]
H_F	Teilfläche von H ₁₀₀ , welche aus anstehendem Fels besteht [km ²]
H-Kub	Kubatur, welche durch Hangprozesse in einen Gerinneabschnitt geliefert wurde und während einem Grossereignis im Gerinne mobilisiert wurde [m ³] (entspricht auch H _M)
H_L	Kubatur, welche durch Hangprozesse insgesamt in einen Gerinneabschnitt geliefert wurde [m ³]
H_M	Kubatur, welche durch Hangprozesse in einen Gerinneabschnitt geliefert wurde und während einem Grossereignis im Gerinne mobilisiert wurde [m ³] (entspricht auch H-Kub)
HM	Hangprozess Hangmure
H_{pot}	Teilfläche von H ₁₀₀ , welche eine Hangneigung zwischen 20 und 48° und keinen anstehenden Fels aufweist [km ²]
H-Proz	Geschiebelieferungsprozess aus dem Hang in das Gerinne
J_{GA}	Mittlere Gerinneneigung eines Gerinneabschnitts [%]
J_{GA}/J_{GAob}	Verhältnis der mittleren Gerinneneigung in einem Gerinneabschnitt zur mittleren Gerinneneigung im direkt oberhalb liegenden Gerinneabschnitt oder zum Durchschnitt der mittleren Gerinneneigungen oberhalb, falls zwei oder mehr Gerinne direkt in diesen Gerinneabschnitt münden [-]
J_{HANG}	Hangneigung [°]
KW	Negativfaktor „Kluftwasser“ (vgl. Kap. 6.3.2)
I	Horizontale Länge eines Gerinneabschnitts [m]
LM	Lockermaterialangebot in einem Gerinneabschnitt
LML	Kategorie der Lockermaterialangebots im Gerinne: Lockermaterial limitiert
LMUL	Kategorie der Lockermaterialangebots im Gerinne: Lockermaterial unlimitiert
I_s	Schiefe Länge eines Gerinneabschnitts [m]
MG	Murgangtransport
NF	Negativfaktor (vgl. auch Kap. 6.3)

PF	Negativfaktor „Permafrost“ (vgl. Kap. 6.3.1)
RU	Hangprozess Rutschung
SG	Seitengerinne
SzO	Optimistisches Szenario bei den Abschätzungs-Validierungsgebieten (vgl. Kap. 11.2)
SzP	Pessimistisches Szenario bei den Abschätzungs-Validierungsgebieten (vgl. Kap. 11.2)
SzX	Szenario X bei den Abschätzungs-Validierungsgebieten (vgl. Kap. 11.2)
T	Funktion eines Gerinneabschnitts während einem Ereignis: Transit
TP	Transportprozess im Gerinne
VB	Querverbau in einem Gerinneabschnitt. Entspricht der Lockermaterialangebots-Klasse „Lockermaterialangebot limitiert“ LML
VK	Negativfaktor „Verklausung“ (vgl. Kap. 6.3.2)

1 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

In alpinen und voralpinen Wildbacheinzugsgebieten führen Grossereignisse immer wieder zu erheblichen Sachschäden, in seltenen Fällen leider auch zu Todesopfern. Neben den hohen Abflüssen sind es meistens die durch Geschiebetrieb oder Murgänge mittransportierten Geschiebemassen, welche auf den besiedelten Schwemmkegeln grossen Schaden anrichten. Beispiele solcher Ereignisse aus der Schweiz sind aus verschiedenen Jahren bekannt. Dazu zählen z. B. die Ereignisse vom 24./25. August 1987 im Minstigerbach, Münster VS (BWW, GIUB 1990), vom 15. August 1997 im Dorfbach Sachseln OW (BWW 1998), vom 15. Oktober 2000 in Baltschiederbach, Baltschieder VS (BWG 2002) oder in jüngster Zeit das Ereignis im Glyssibach in Brienz vom 22./23. August 2005 (TBA Kt. BE, 2006).



Abb. 1-1: Geschiebeablagerungen auf dem Schwemmkegel des Schwendibachs, Grindelwald, August 2005

Die Beurteilung des Gefahrenpotenzials von Wildbächen wird in der Schweiz in den meisten Fällen durch Naturgefahrenexperten/innen aus privaten Büros durchgeführt. Dabei sehen sich diese Praktiker/innen u. a. täglich mit der Herausforderung konfrontiert, auf der Basis möglicher Ereignisszenarien Abschätzungen der dabei in die Siedlungsgebiete transportierten Geschiebefrachten zu erstellen. Dies dient als Grundlage für die Erstellung von Gefahrenkarten oder zur Dimensionierung von Schutzmassnahmen.

Diese Abschätzungen sind jedoch mit verschiedenen Schwierigkeiten verbunden: Die Prozesse der Geschiebemobilisierung, des –transports und der Geschiebeablagerung sind komplex und das Spektrum möglicher Ereignisabläufe ist breit. Dabei können kleine, lokale Zufälligkeiten diese Prozesse und Ereignisabläufe massgeblich beeinflussen, was dem ganzen eine gewisse unberechenbare Komponente verleiht. Langjährige Messdaten zu Geschiebefrachten in Wildbacheinzugsgebieten existieren kaum und können somit nicht für statistische Analysen genutzt werden. Der Praxis stehen zwar verschiedene Abschätzverfahren zur Verfügung. Diese sind jedoch entweder zu stark vereinfacht und somit zu ungenau oder zu detailliert und dadurch aufgrund der zur Verfügung stehenden Mittel zu teuer für die praktische Anwendung.

1.1 Zielsetzung

1.1.1 Übergeordnete Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit wird als Mosaikstein in der aktuellen Wildbachforschung verstanden. Sie soll einerseits einen Beitrag zur Reduktion von bestehenden Unsicherheiten im Prozessverständnis des Geschiebehaushalts steiler Wildbäche leisten. Andererseits sollen diese Erkenntnisse so umgesetzt und aufbereitet werden, dass sie für Praktiker/innen als konkrete, pragmatische Hilfsmittel in der täglichen Arbeit bei der Abschätzung von Geschiebefrachten genutzt werden können.

Die vorliegende Arbeit orientiert sich gemäss dem Konzept des Integralen Risikomanagements (BABS 2003) am Grundsatz, vergangene, real abgelaufene Ereignisse zu analysieren und daraus wertvolle Lehren zu ziehen. Dieses Lernen kann dazu beitragen, die Beurteilung von Wildbachgefahren zu verbessern und konkrete Vorsorgemassnahmen wie raumplanerische, technische und organisatorische Massnahmen Kosten-Nutzen-wirksam zu planen. Ziel dieser Massnahmen ist ein optimales Management eines Ereignisablaufs mit möglichst keinen Schäden an Personen und Sachwerten.

1.1.2 Konkrete Zielsetzung

Ziele dieser Arbeit sind, anhand von detaillierten Analysen abgelaufener Grossereignisse ≥ 100 jährlich im Schweizer Alpenraum:

- **Einen Beitrag zu einem besseren Prozessverständnis des Geschiebehaushalts steiler Wildbacheinzugsgebiete während Grossereignissen zu liefern:**
 - Identifizieren von relevanten Einflussfaktoren auf die ablaufenden Geschiebeprozesse während einem Grossereignis.
 - Gewichtung dieser Einflussfaktoren in ihrem Zusammenwirken im „Gesamtsystem Wildbach“.
 - Quantitatives Aufzeigen der Auswirkungen von Einflussfaktor-Kombinationen auf die Art des Transportprozesses sowie die Menge der Geschiebemobilisierung und -ablagerung in einzelnen Hang- und Gerinneabschnitten.

- **Ein empirisches Geschiebeabschätzverfahren für Grossereignisse in Wildbacheinzugsgebieten für die Praxis zu entwickeln:**
 - Das Geschiebeabschätzverfahren soll anwendbar sein für Wildbachsysteme mit einer Einzugsgebietsfläche $< 10 \text{ km}^2$.
 - Das methodische Verfahren soll wenn möglich GIS-basiert sein.
 - Der individuelle Charakter jedes Wildbachsystems soll bei der Beurteilung berücksichtigt werden.

- Es soll die Möglichkeit zur Analyse verschiedener Ereignisabläufe und Ablaufszenarien bestehen.
- Durch die Anwendung des Geschiebeabschätzverfahrens sollen Aussagen zur Geschiebefracht bei einem gewählten Szenario für ein Grossereignis ≥ 100 jährlich möglich werden.
- Das entwickelte Geschiebeabschätzverfahren soll umfassend validiert und einer Sensitivitätsanalyse unterzogen werden, damit Stärken und Schwächen transparent offen gelegt werden können.

1.2 Gliederung der Arbeit

Nach diesem einleitenden Kap. 1 werden in Kap. 2 Theoretische Grundlagen vorgestellt, insbesondere zu den am Geschiebehaushalt in Wildbachsystemen beteiligten Prozessen und zu verschiedenen bestehenden Abschätzverfahren. In Kap. 3 wird die angewandte Methodik beschrieben, in Kap. 4 werden anschliessend die untersuchten Wildbacheinzugsgebiete vorgestellt.

Kap. 5 bis Kap. 9 bilden einen ersten Resultate-Teil, in welchem die Erkenntnisse zum ersten Ziel der Arbeit, dem Beitrag zu einem besseren Prozessverständnis, vorgestellt werden. Dabei widmet sich Kap. 5 der Systembetrachtung von Wildbacheinzugsgebieten, in Kap. 6 werden die Einflussfaktoren auf den Geschiebehaushalt vorgestellt. Erkenntnisse zu den Geschiebeprozessen im Hang befinden sich in Kap. 7, während in Kap. 8 die Ergebnisse zu den Geschiebeverlagerungsprozessen im Gerinne vorgestellt werden. Kap. 9 widmet sich den Geschiebefrachten am Kegelhals der ausgewerteten Grossereignisse.

Der zweite Resultate-Teil beinhaltet in Kap. 10 das neu entwickelte Geschiebeabschätzverfahren zur Abschätzung von Geschiebefrachten bei Grossereignissen. Die Validierung und Sensitivitätsanalyse dieses Abschätzverfahrens werden in Kap. 11 vorgestellt.

Kap. 12 bildet die Synthese und den Ausblick.

1.3 Factsheets zu den untersuchten Wildbacheinzugsgebieten

Am Ende der Arbeit existiert ein umfangreicher Anhang. Im Anhang A sind alle in dieser Arbeit für die Analysen und Validierung untersuchten Wildbäche auf je einem nummerierten Factsheet vorgestellt. Neben einer Karte mit Abbildung des Einzugsgebiets sind jeweils die für die Arbeit verwendeten homogenen Gerinneabschnitte mit ihren wichtigsten Kennzahlen dargestellt. Ebenfalls sind dort Informationen zu den Ereignisabläufen, Geschiebebilanzen und Quellen dieser Informationen zu finden. Im Text dieser Arbeit wird immer wieder auf diese Factsheets verwiesen. Dabei wird jeweils der Bachname verwendet und anschliessend eine Nummer angegeben. Dorfbach (36) bedeutet z. B., dass mehr Informationen zu diesem Bach im Anhang A auf Factsheet Nummer 36 zu finden sind. Dorfbach (36-5) bedeutet, dass sich der Verweis auf den Gerinneabschnitt (Nr. 5) im Dorfbach (Factsheet Nr. 36) bezieht. Nähere Informationen zu diesen Verweisen im Text können somit jederzeit gezielt in den Factsheets im Anhang A gefunden werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Begriffe und Definitionen

In diesem Kapitel werden die Definitionen der Begriffe im Arbeitstitel der vorliegenden Dissertation erläutert, welche für das Verständnis notwendig sind.

2.1.1 Wildbach

„Wildbäche sind oberirdische Gewässer mit zumindest streckenweise grossem Gefälle, rasch und stark wechselndem Abfluss und zeitweise hoher Feststoffführung.“ (DIN 19663 1985)

Eine detaillierte Definition geben BWV und GIUB (1990):

„Ein Wildbach ist ein oberirdisches Fließgewässer

- mit zumindest streckenweise grossem Gefälle und mit verhältnismässig kleinem Einzugsgebiet,
- das eine stark wechselnde Wasserführung aufweist, die hervorgerufen durch Starkregen und/oder plötzlicher Schneeschmelze oft rasch, sprunghaft oder bei langanhaltenden Niederschlägen im Zusammenhang mit Sättigung und hoher Wasserführung des Bodens allmählich anschwillt
- und das dabei von Sohle und Ufer grosse Feststoffmassen, meist mit bedeutendem Geschiebeanteil erodieren und oft Feststoffe von den Einhängen und aus Runsen empfangen kann, wobei diese ruckweise, pulsierend und oft mit Wildholz vermischt durch die Wassermassen weitertransportiert (Geschiebetrieb) oder in Form von Murgängen weiterverlagert und die schliesslich am Schwemmkegel abgelagert oder einem Vorfluter zugeführt werden.“

Weiterführende Grundlagen zu Wildbachsystemen liegen in Kap. 2.2 und Kap. 2.3 vor.

2.1.2 Geschiebe

In GHÖ (1992) wird der Begriff Geschiebe allgemein folgendermassen definiert: „Geschiebe ist der entlang der Gerinnesohle transportierte Feststoffanteil, meist Flussbettmaterial.“

Geschiebe ist also ein Anteil der in Gewässern transportierten Feststoffe. Unter dem Begriff Feststoffe verstehen Spreafico et al. (2005): „die Gesamtheit der festen Stoffe, welche im Wasser transportiert oder abgelagert werden. Feststoffe sind also Geschiebe, Schwebstoffe, Geschwemmsel und Eis. [...] Bei steilen Bächen mit Gefällen über 30% lässt sich die Feststoffführung meistens nur noch bei Nieder- und Mittelwasser in einen Geschiebe- und einen Schwebstoffanteil unterteilen. Bei grossen Abflüssen ist eine Trennung nicht mehr möglich. Man fasst deshalb die beiden Teile zusammen und benennt diese Gesamtheit mit „Geschiebe“. Dieses „Geschiebe“ stammt nicht nur aus dem Gerinne selbst, sondern wird aus Seitenbächen, Runsen, Lawinenzügen, Hangrutschungen usw. geliefert. Es handelt sich deshalb auch um gerinnefremdes Material. [...] Das Material ist in der Regel sehr heterogen zusammengesetzt

(Grösse, Lithologie). Die Geschiebekornverteilung variiert stark. Diese Variation besteht sowohl zeitlich als auch räumlich. Ausserdem nimmt die maximale transportierte Korngrösse mit steigender Wasserführung oftmals zu.“

Detaillierte Grundlagen zum Geschiebehaushalt und den daran beteiligten Prozessen sind in Kap. 2.3 zu lesen.

2.1.3 Grossereignis

Unter einem Grossereignis wird in dieser Arbeit ein Ereignis mit einer Jährlichkeit von ca. ≥ 100 verstanden (Gertsch und Kienholz 2008).

Der Begriff der Jährlichkeit, Wiederkehrdauer wird in Loat et al. (2003) definiert als „Zeitspanne, in der ein Ereignis einen Wert im Durchschnitt einmal erreicht oder überschreitet.“

Ein Grossereignis ist somit ein Ereignis, das so stark und heftig ist, dass es im Durchschnitt nur alle 100 Jahre oder seltener vorkommt.

Weiterführende Informationen über die Zuordnung von Jährlichkeiten im Rahmen dieser Arbeit und die Schwierigkeiten, die sich dabei ergeben, befinden sich in Kap. 3.3.3.1.

2.2 Komponenten eines Wildbachsystems

Nach Kienholz et al. (1998) kann jeder Wildbach mit seinem Einzugsgebiet und Gerinnesystem als ein Individuum betrachtet werden. Im Erscheinungsbild und in den Prozessabläufen können jedoch ähnliche räumliche und funktionale Komponenten unterschieden werden (vgl. Abb. 2-1).

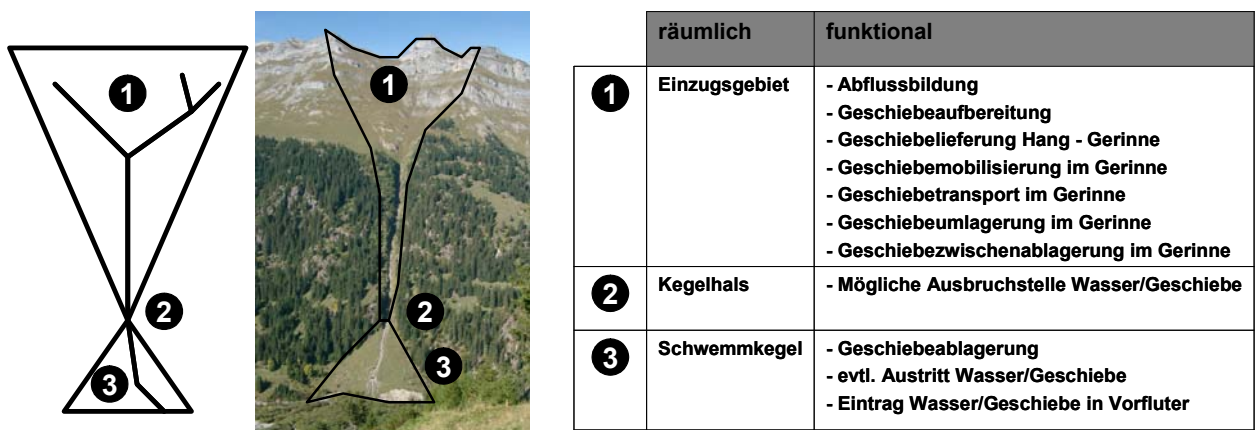


Abb. 2-1: Räumliche und funktionale Komponenten eines Wildbachsystems

2.2.1 Räumliche Komponenten

Kienholz et al. (1998) unterscheiden in einem Wildbach zwischen folgenden räumlichen Komponenten (vgl. auch Abb. 2-1):

- Einzugsgebiet mit
 - Hängen
 - Runsen und dem
 - Gerinnesystem mit einem Haupt- und evtl. einem oder mehreren Seitengerinnen
 sowie in den meisten Fällen einem
- Schwemmkegel, der durch den Kegelhals vom Einzugsgebiet abgegrenzt wird.

2.2.2 Funktionale Komponenten

Im vereinfachten Prozesssystem Wildbach in Abb. 2-2 sind die wichtigsten funktionalen Komponenten ersichtlich.

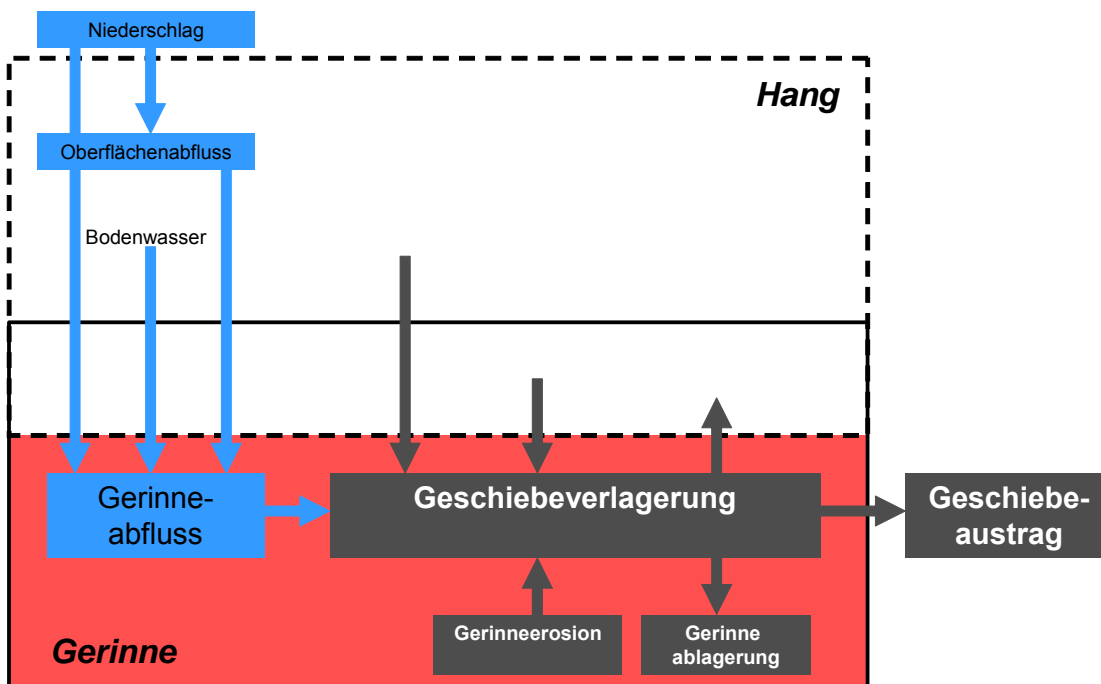


Abb. 2-2: Vereinfachtes Prozesssystem für Wildbäche (verändert nach Liener 2000)

Dabei werden räumlich das Hangsystem (gestrichelte Umrandung) und das Gerinnesystem (durchgezogene Umrandung) unterschieden. Das Hangsystem und das Gerinnesystem sind im Bereich der Gerinneböschung überlappend, was in Abb. 2-2 durch die Mischfarbe orange dargestellt ist.

Im vereinfachten Prozesssystem Wildbach steht die Geschiebeverlagerung (graue Kästen) im Vordergrund (vgl. auch Kap. 2.3). Der Fluss des Wassers (blaue Kästen) ist aber entscheidender Motor dieser Verlagerungen, indem es durch den Niederschlag einerseits zu einer Infiltration von Wasser in den Bodenkörper und andererseits zur Bildung von Oberflächenabfluss in Hang und Gerinne kommt. Durch dieses unter- und oberirdische Wasser als Transportmittel können die Geschiebeprozesse initiiert werden. Im Hang erfolgt die Geschiebelieferung vor al-

lem durch fluviale Erosion und Rutschprozesse, welche das Lockermaterial in das Gerinne oder gerinnennahe Bereiche bringen. Auch im Gerinne inklusive den Böschungen wird Geschiebe mobilisiert und durch verschiedene Verlagerungsprozesse (Geschiebetrieb oder Murgang) ins Tal verlagert. Unterwegs kann es zu Zwischenablagerungen im oder ausserhalb des Gerinnes kommen. Schliesslich wird das mitgeführte Geschiebe entweder auf dem Schwemmkegel abgelagert oder in den Vorfluter getragen.

2.3 Geschiebeprozesse im Einzugsgebiet von Wildbachsystemen

2.3.1 Geschiebeaufbereitung

„Voraussetzung für jede Feststoffverlagerung in einem Wildbacheinzugsgebiet ist das Vorhandensein von mobilisierbarem Material. Dieses Material wird in der Regel durch Verwitterungsvorgänge bereitgestellt (z.B. Gehängeschutt) oder wurde in der Vergangenheit an seinen heutigen Ort verfrachtet. Die Materialaufbereitung nimmt in der Regel lange bis sehr lange Zeiträume in Anspruch.“ (Kienholz et al. 1998)

Wichtige Einflussfaktoren auf die Geschiebeaufbereitung sind die Geologie, die Höhenlage und die Exposition.

Stiny (1931) unterscheidet zwischen Jungschuttherden und Altschuttherden:

- **Jungschutt** ist Verwitterungsschutt, der „jünger“ ist als der Bach in seiner heutigen Ausprägung und der immer wieder erneuert wird (z.B. Ablösungsgebiete von Felssturzmassen oder Steinschlag). Jungschutt ist locker abgelagert, gut Wasser durchlässig und hat wenig Feinanteile.
- **Altschutt** ist Schutt, der „älter“ ist als die jetzige Bachtätigkeit und der heute keinen Zuwachs mehr erhält (z.B. Eiszeitliche Moränen, Talverfüllungen, relikte Schwemm- und Schuttkegel). Altschutt hat bedeutende Anteile an verkittenden Feinkomponenten und hat verschiedene Wasserdurchlässigkeiten.

2.3.2 Geschiebelieferung Hang – Gerinne

Die Geschiebelieferung vom Hang in das Gerinne erfolgt durch verschiedene Hangprozesse:

2.3.2.1 Fluviale Erosion

„Fluviale Erosion ist das Ablösen und die Verlagerung von Lockermaterial und Festgestein durch Regentropfen (Splasherrosion), oberflächlich und unterirdisch fliessendem Wasser“ (Lieber 2000, übersetzt nach Selby 1993).

Für die Geschiebelieferung in Wildbächen besonders relevant ist die Runsenerosion, wobei laut Lehmann (1993) folgende Prozesse ablaufen:

- Ausräumung von Zwischendeponien in bestehenden Runsen, wobei meist nur kleine Feststoffmengen aus einer einzelnen Runse in das Gerinne gelangen.

- Bildung bzw. Eintiefung von Runsen in Schuttkörpern mit steiler Oberfläche. Die Mobilisierung und der Transport finden hier oft durch Murgänge (vgl. Kap. 2.3.4.2) statt, wobei erhebliche Feststoffmengen verlagert werden können.
- Neubildung von Runsen durch Erosion als Sekundärprozesse in Hängen direkt unterhalb von Rutschungen“.

Die Ausprägung von Runsen ist v.a. abhängig von der Disposition eines Hanges. Diese wird bestimmt durch Hangrelief, Neigung, Vegetation, Wassermenge und Verhalten des Substrats gegenüber dem Wasser.

2.3.2.2 Rutschungen und Hangmuren

„Eine Rutschung ist eine hangabwärts gerichtete Bewegung von Hangteilen aus Fels- und/oder Lockergesteinsmassen an Hängen als Ergebnis eines Scherbruches der bewegten Masse“ (BUWAL 1998).

Wichtige Einflussfaktoren auf die Auslösung einer Rutschung sind die Lockermaterialeigenschaften, welche die Wasserzirkulation, die Wasseraufnahmefähigkeit, Durchlässigkeit sowie die Scherfestigkeit bestimmen. Zusätzlich bestimmen die Faktoren Hangneigung, Mikrorelief und Bodenbedeckung das Verhältnis von Infiltration zu Oberflächenabfluss, also auch über die Wassermenge und über die Aufenthaltsdauer des Wassers im Bodenkörper.

Rutschungen werden nach BWW und BUWAL (1995) unterschieden in:

- Flachgründige Rutschungen mit einer Anrissmächtigkeit von weniger als 2 m
- Mittelgründige Rutschungen mit einer Anrissmächtigkeit zwischen 2 und 10 m
- Tiefgründige Rutschungen mit einer Anrissmächtigkeit grösser als 10 m

Folgende Rutschtypen werden unterschieden:

- **Translationsrutschungen** im Lockermaterial sind flachgründige Rutschungen mit einer planaren, ungefähr hangparallelen Gleitfläche.
- **Rotationsrutschungen** treten meistens in genügend tiefem und relativ homogenem kohäsiven Material auf. Sie können aber auch in Böden entstehen, in denen der Porenwasserdruck sehr hoch werden kann. Dieser Rutschtyp verläuft mit mittlerer Geschwindigkeit entlang einer klar definierten Gleitfläche, die modellmässig näherungsweise oft als kreiszylindrisch beurteilt werden kann.
- **Fliessrutschungen/Hangmuren:** Hangmuren werden in BUWAL (1998) wie folgt definiert: „An relativ steilen Hängen erfolgendes, schnell abfließendes Gemisch aus Lockergestein (meist Boden und Vegetationsbedeckung) und viel Wasser, ohne Vorhandensein bzw. Ausbildung einer Gleitfläche.“ Der Unterschied zu Translations- und Rotationsrutschungen ist somit der hohe Anteil an Wasser und die oft fehlende Gleitfläche, wobei die Übergänge fließend sind und im Gelände nicht in jedem Fall klar abgegrenzt werden können.
- **Felsrutschungen:** Unter einer Felsrutschung versteht man ein langsames Abrutschen von grossen kompakten Gesteinspaketen auf einer eher flachen Gleitbahn, ohne dass die ursprüngliche Lagerung wesentlich zerstört wird (nach Spreafico et al. 1996).
- **Sackungen** zeichnen sich als Massenbewegungen im Fels aus, die nicht entlang von präformierten Gleitflächen stattfinden, sondern eine deutliche Vertikalkomponente aufweisen,

bei welcher das bewegte Material oft im Schichtverband verbleibt (nach Spreafico et al. 1996).

Rutschungen sind für die Geschiebelieferung vom Hang in das Gerinne relevante Prozesse, die vor und v.a auch während einem Ereignis grosse Mengen an Geschiebe liefern können.

2.3.2.3 Sturzprozesse

BUWAL (1998) definiert Sturzprozesse folgendermassen: „Schnelle Massenbewegungen, bei welchen das bewegte Material den grössten Teil des Weges in der Luft zurücklegt (fallend, springend, teilweise auch rollend)“.

Einflussfaktoren für Sturzprozesse sind durch die geologisch-tektonischen Voraussetzungen, sowie die geomechanischen Eigenschaften des anstehenden Gesteins bestimmt. Ausgelöst werden Sturzbewegungen neben der gravitativen Wirkung durch Entlastungen verschiedener Art, z. B. durch Verlust des Hangwiderstandes, durch Wirkungen des Wassers in flüssiger oder fester Form oder durch Erschütterungen.

„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.“(Spreafico et al. 1996)

2.3.2.4 Materialeintrag durch Schnee und Lawinen

Durch Lawinen und Gleitschnee kann Boden- und Lockermaterial aufgeschürft und abgetragen werden, so dass flachgründig sog. „Blaiken“ entstehen. Diese sind als Geschiebeherde meist wenig bedeutend und in ruhigen Phasen kann auch wieder Vegetation Fuss fassen.

2.3.2.5 Mobilisierung des Hanginputs im Gerinne

Das durch Hangprozesse in den Gerinnebereich gelieferte Geschiebe liegt dort zur Mobilisierung bereit. Falls während einem Ereignis genügend Transportkapazität im Gerinne vorherrscht, kann die gesamte Menge mobilisiert werden. Wenn dies nicht der Fall ist, wird das Geschiebe nur teilmobilisiert, was insbesondere bei grösseren seitlichen Rutschungen oft vorkommt. Im schlimmsten Fall ist die gelieferte Menge pro Zeit so gross, dass sich eine Verklausung bilden kann, welche den Gerinneabfluss temporär blockiert. Plötzliche Durchbrüche solcher Verklausungen können zur Bildung von Murgängen führen.

2.3.3 Geschiebemobilisierung im Gerinne

Grundsätzlich findet in einem Gerinne Erosion statt, wenn die Kräfte der Wasser- und Feststoffmassen grösser sind als die Widerstandskraft der Gerinnesohle und/oder der Böschung. Unterschieden werden dabei folgende Mobilisierungsprozesse:

- **Tiefenerosion:** „Durch fließendes Wasser verursachte Erosion, die vorwiegend in die Tiefe wirkt.“ (Loat et al. 2003).
- **Seitenerosion:** „Fluviale Erosion, die vorwiegend in seitlicher Richtung wirkt.“ (Loat et al. 2003)

In der Realität ist es nicht immer einfach, Tiefenerosion und Seitenerosion voneinander abzugrenzen, da die Übergänge fließend sind. Oft erfolgt ab einem gewissen Grad an Tiefenerosion infolge Anschnitts des Böschungsfusses und Übersteilung des natürlichen Böschungswinkels ein Nachrutschen der Böschungen (Nachböschung) und dadurch Seitenerosion.

Grundsätzlich ist die Geschiebemobilisierung im Gerinne abhängig von:

- Abfluss
- Menge und Art des Lockermaterialangebots
- Gefälle
- Gerinnegeometrie

2.3.4 Geschiebetransport im Gerinne

„Der Geschiebetransport im Wildbach wird durch die vielschichtigen Strömungsverhältnisse beeinflusst. Wesentliche Zusammenhänge zwischen Abfluss und Feststofftransport sind aber noch ungeklärt.“ (Spreafico et al. 1996) Diese Aussage gilt auch heute noch so.

Im Zusammenhang mit Geschiebetransport werden in dieser Arbeit mehrfach die Begriffe „sedimentlimitiert“ und „abflusslimitiert“ verwendet. Darunter wird folgendes verstanden:

- **Abflusslimitierte Bedingungen:** Bei abflusslimitierten Bedingungen steht in der Gerinne-
sohle ein quasi unlimitiertes Lockermaterialangebot zur Verfügung. Die Menge des mobilisierbaren Geschiebes wird somit durch die Menge an Abfluss, bzw. die Transportkraft bestimmt und dadurch auch durch die Menge des Abflusses limitiert.
- **Sedimentlimitierte Bedingungen:** Bei sedimentlimitierten Bedingungen ist das Lockermaterialangebot in einem Gerinne sehr klein und limitiert, z.B. durch ein volumenmäßig geringe Zwischendepots auf einer festen Felssohle. Dadurch kann trotz eines hohen Abflusses nur wenig Geschiebe mobilisiert werden. Die Menge des mobilisierbaren Geschiebes wird somit durch das Lockermaterialangebot limitiert.

Vom Transportprozess her können grundsätzlich 3 Haupttransportarten von Geschiebe in Wildbächen unterschieden werden: Schwebstofftransport, Geschiebetrieb und Murgangtransport. Wobei auch hier die Grenzen fließend verlaufen. Deshalb wird beispielsweise bei Unsicherheiten bezüglich Murgangtransports auch etwa von murgangähnlichem Transport gesprochen.

2.3.4.1 Schwebstofftransport und Geschiebetrieb

In Kienholz et al. (1998) werden die Begriffe Schwebstofftransport und Geschiebetransport folgendermassen definiert:

- **Schwebstofftransport:** Verlagerung von Feststoffen in einem Gerinne ohne Kontakt zur Gerinnesohle, wobei diese Partikel vor allem durch die Turbulenz der Strömung in der Schwebelage gehalten werden.
- **Geschiebetransport:** Rollende oder springende Verlagerung von Feststoffen entlang der Sohle des Gerinnes unter der Wirkung der Schleppspannung des Wassers.

Spreafico et al. (1996) erklären die grundsätzlichen Unterscheidungsmerkmale zwischen Schwebstoff- und Geschiebetransport wie folgt:

„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.“

2.3.4.2 Murgangtransport

Definitionen

Nach Gamma (2000) sind Murgänge „ein Gemisch aus Wasser, Sedimenten unterschiedlicher Korngrösse (Tone bis Blöcke) und Luft, welches sich unter dem Einfluss der Schwerkraft lawinenartig talwärts bewegt.“

In BUWAL (1998) steht folgende Definition: „Ein Murgang ist ein schnell fließendes Gemisch von Wasser und Feststoffen mit einem hohen Feststoffanteil von ca. 30 bis 60%, oft schubartig in Wildbächen und Murgängen erfolgend. Typisch sind eine grosse Dichte, z.T. hohe Fließgeschwindigkeiten, eine hohe Transportkapazität (Blöcke von mehreren m³ Volumen) und grosse umgesetzte Feststoffvolumina.“ Im Gegensatz zu Murgängen liegt der Feststoffanteil bei Geschiebetransport bei maximal 10%.

Spreafico et al. 1996 definieren einen Murgang folgendermassen: „Ein Murgang ist eine durch einen Ausbruch aus wassergesättigtem Lockermaterial im Hang, Sohlenverflüssigung, oder einen Dammbrechung 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 Material-Entmischung ‚en masse‘ zum Stillstand kommt.“

Laut VAW (1991) müssen folgende Bedingungen für die Entstehung eines Murganges erfüllt werden:

- Vorhandensein von mobilisierbarem Gesteinsmaterial
- Starke und möglicherweise unregelmässige Wasserzufuhr
- Minimales Gefälle

Anrisszonen und Entstehungsmechanismen von Murgängen

Laut Rickenmann (1995) beträgt das Mindestgefälle für die Entstehung eines Murgangs aus dem Gerinnebett oder Hang heraus ca. 25% bis 30%. Bei Vorhandensein weiterer, die Murgangentstehung fördernder Faktoren (z.B. Engstellen, Wildholz) kann sich ein Murgang aber auch bei Gefällen von ca. 15% bis 25% bilden.

Zimmermann (1990) unterscheidet je zwei Anrisstypen von Murgängen im Hang und im Gerinne, welche in Gamma (2000) beschrieben und in Fässler (2008) übersichtlich dargestellt sind (vgl. Tab. 2-1).

Tab. 2-1: Anrisszonen von Murgängen (aus Fässler 2008 nach Zimmermann 1990)

Hanganrisszone	Typ 1	Anrisszone:	Steiler, meist schwach konsolidierter, teilweise tiefgründiger Schutthang (rezente bis subrezente Moränen oder Gehängeschutt, glaziale Talverfüllung)
		Ausbildung des Ausbruches:	Übersättigung des Lockermaterials mit nachfolgendem Abgleiten (Hanginstabilität). Rückschreitende Erosion von einem Quellhorizont aus (Hanganriss, Rutschung). In Permafrost-Gebieten: Rutschungen in Auftauschicht.
		Hangneigung:	27 – 38° (50 – 78%)
	Typ 2	Anrisszone:	Kontaktbereich Felswand mit (steiler) Schutthalde (normalerweise Konzentration des Abflusses in Felsrinne und Versickerung des Wassers in der Schutthalde)
		Ausbildung des Ausbruches:	Keilanbruch durch die Kolkwirkung der herabstürzenden Wassermassen, rasche Wassersättigung aufgrund untief anstehendem Fels, meist progressive Erosion.
		Hangneigung:	Ähnlich wie bei Typ 1, > 25°
Gerinneanrisszone	Typ 3	Anrisszone:	Schuttgefülltes Felscouloir (Fels als Erosionsbasis), Freilegung in den letzten Jahrzehnten durch Gletscherrückzug
		Ausbildung des Ausbruches:	Instabilität der Bachsohle. Rückschreitende Erosion, Ausräumung des Couloirs
		Hangneigung:	24 – 35°
	Typ 4	Anrisszone:	Grössere Zwischendeponien von Bachschutt im (steilen) Gerinne
		Ausbildung des Ausbruches:	Progressive Erosion, bescheidenes Startvolumen im Verhältnis zum Gesamtvolumen, manchmal im Zusammenhang mit Verklausung
		Hangneigung:	13 – 33°

Bei der Auslösung von Murgängen können grundsätzlich drei Entstehungsmechanismen unterschieden werden (Haerberli et al. 1991, Takahashi 1978, Costa 1984):

- Hanginstabilität bzw. Hangrutschung mit Verflüssigung des Materials und Weiterfliessen als Murgang (bei Hängen steiler als 27° bzw. 51%, v.a. in Anrisszonen Typ 1 und 2 vgl. Tab. 2-1)
- Verflüssigung eines Teils des Lockermaterials im Gerinnebett bei genügendem Gefälle (grösser als 15° bzw. 27%) und einer Belastung durch Oberflächenabfluss (Überschreiten einer kritischen Wassertiefe). Dieser Mechanismus tritt hauptsächlich in den Anrisszonen Typ 2 bis 4 in Tab. 2-1 auf.
- Bruch einer Blockierung oder Verklausung im Gerinne. In den eigentlichen Wildbachgerinnen (Anrisszone Typ 4) kann durch gröbere Blöcke und/oder Holz in Engstellen oder durch eine seitliche Hangrutschung ins Gerinne ein temporärer Damm entstehen, der durch den Druck oder die Erosionskraft des zurückgehaltenen Wassers und Geschiebes plötzlich bricht.

Verlagerungsmechanismen

Murgänge können nach Gamma (2000) während einem Ereignis in einem oder mehreren Murschüben niedergehen. Dazwischen ist die Abflussmenge oft reduziert. Die einzelnen Murschübe können ausgelöst werden durch aufeinander folgende Anbrüche im Anrissgebiet, die rasche Mobilisierung von weiteren Materialdepots z.B. im Gerinne durch temporäre Verkläuerungen an Engstellen, seitlichen Rutschungen, Uferanbrüche oder seitlicher Reinwasserzufuhr.

Tognacca (1999) teilt Murgänge schematisch in drei Zonen ein: in eine Murgangfront, in einen Murgangkörper und in eine Erosionszone, die der eigentlichen Murgangwelle folgt. Die Übergänge dieser Zonen sind fließend. Die Mechanismen der Erosion eines Gerinnemurganges sind noch nicht klar (Gamma 2000). Klar ist nur, dass Veränderungen der Gerinnegeometrie bei Murgängen viel ausgeprägter sein können als bei reinem Hochwasser. Durch die hohe Gesamtdichte, das grosse Volumen und die hohe Geschwindigkeit der Murfront ergeben sich enorme Kräfte.

Spuren von Murgängen

Spuren im Gelände, die auf Murfähigkeit eines Wildbachs hinweisen sind:

- U-förmiges Gerinneprofil
- Massive Tiefenerosion
- Levées (Schuttwülste am Rand des Gerinnes)
- Grosse gerundete Blöcke von mehreren m³
- Murköpfe
- Murzungen
- Unsortierte Ablagerungen auf dem Kegel

2.3.5 Geschiebeumlagerung und –ablagerung

„Sobald das Transportvermögen des Fließgewässers nicht mehr ausreicht, um das anfallende Feststoffmaterial weiter zu bewegen, kommt es zur Ablagerung. Auflandungs- oder Akkumulationsstrecken finden sich meist in den unteren Bachbereichen mit geringerem Gefälle.“ (Spreafico et al. 1996)

Ablagerungsstrecken im Einzugsgebiet sind zudem oft am Ausgang von Schluchtstrecken zu beobachten. Hier reduziert sich das Gefälle und die Bachbreite wird vergrößert. Auch hinter natürlichen oder künstlichen Erosionsbasen/Sohlenfixpunkten durch Felsriegel, Karschwellen oder Querverbau-Werken können Ablagerungen beobachtet werden.

2.4 Das Konzept der Disposition

„Die Disposition zu gefährlichen geomorphologischen Prozessen in Gebirgsräumen ist die Anlage oder Bereitschaft von Wasser, Schnee, Eis, Erd- und Felsmassen, sich (in reiner Form oder vermischt) unter dem Einfluss der Schwerkraft so talwärts zu verlagern, dass dies zu Schäden führen kann.“ (Kienholz 1995)

Das Konzept der Disposition (vgl. Abb. 2-3) bildet eine wesentliche Grundlage zum Verständnis der vorangehend aufgeführten geomorphologischen Prozesse, welche in einem Wildbach auftreten können. Es wird durch die folgenden 3 Elemente gebildet (nach Kienholz 1995):

1. Die **Grunddisposition** ist die über längere Zeit gleich bleibende Bereitschaft zu (gefährlichen) geomorphologischen Prozessen in Gebirgsräumen. Im Vergleich zum menschlichen Wesen ist die Grunddisposition vergleichbar mit dem Charakter des Menschen. Sie wird bestimmt durch längerfristig konstant bleibende Parameter wie Relief, Klima usw. Dennoch ist eine gewisse langfristige Variabilität möglich (Jahrzehnte bis Jahrhunderte). Die Grunddisposition bestimmt das räumliche Auftreten von geomorphologischen Prozessen und deren Ereignisgrösse.

Die Grunddisposition für Geschiebeprozesse in Wildbacheinzugsgebieten wird hauptsächlich bestimmt durch das Relief, die Verfügbarkeit von Schutt, Abfluss, Geologie und Materialeigenschaften.

2. Die **variable Disposition** ist die bei gegebener Grunddisposition zeitlich variable, in einem bestimmten Umfang schwankende oder sich entwickelnde effektive Bereitschaft zu geomorphologischen Prozessen. Beim Menschen könnte man die variable Disposition vergleichen mit der Laune. Die variable Disposition wird bestimmt durch mittel- bis kurzfristig variable Grössen wie Jahreszeit, meteorologische Situation etc. Die Variabilität bewegt sich im Bereich von Tagen bis Jahrzehnten. Die variable Disposition bestimmt das zeitliche Auftreten und die Häufigkeit von geomorphologischen Prozessen.

Die variable Disposition für Geschiebeprozesse in Wildbacheinzugsgebieten wird gesteuert von der Jahreszeit, von der temporären Materialverfügbarkeit und von den Materialeigenschaften, die wiederum abhängig sein können von der hydrologisch-meteorologischen Witterungssituation.

3. Das **auslösende Ereignis** setzt bei genügend hoher Disposition (Grund- und variable Disposition) den gefährlichen Prozess in Gang. Wiederum im Vergleich zum Menschen ist das auslösende Ereignis der Tropfen, der das Fass zum Überlaufen, resp. den Menschen z.B. zu einem Wutausbruch bringt. Die zeitliche Dimension des auslösenden Ereignisses umfasst Minuten bis Tage.

Beim auslösenden Ereignis für Wildbachereignisse nennen Zimmermann et al. (1997) im Zusammenhang mit Murgängen drei verschiedene hydrologische Auslöser:

- Kurze, konvektive Niederschläge (Gewitter) mit einer hohen Intensität
- Langanhaltende Regenperioden mit niedrigen und mittleren Intensitäten, aber einer hohen Niederschlagssumme, teilweise kombiniert mit vorangehender Schneeschmelze
- Ausbrüche von Wassertaschen in Gletschern oder den Ausbruch von Flutwellen durch den Bruch von moränen- oder eisgestauten Seen

Die Disposition beschreibt den Systemzustand über die Zeit. Damit ein Prozess ausgelöst wird, braucht es eine Systembelastung von aussen, die den durch die Disposition bestimmten Schwellenwert überschreitet. Je höher die aktuelle Disposition, desto tiefer liegt der aktuelle Schwellenwert zur Auslösung gefährlicher Prozesse.

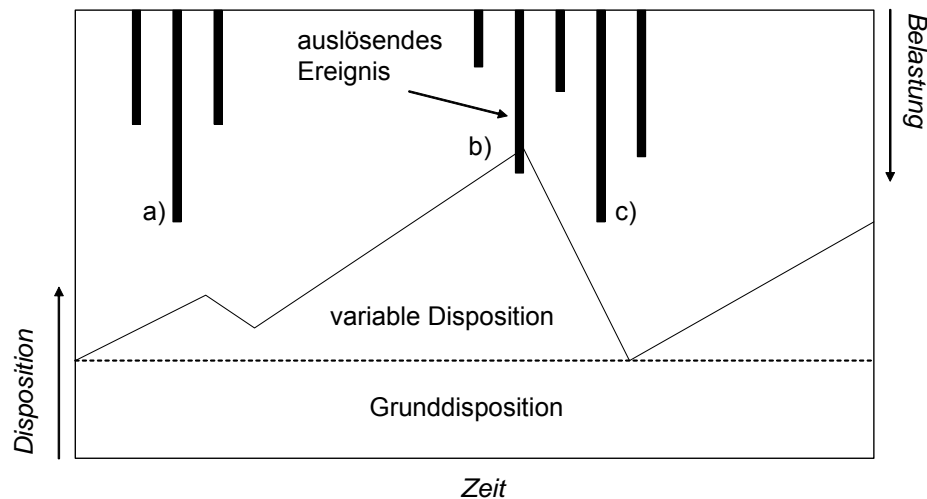


Abb. 2-3: Zusammenspiel von Disposition und auslösendem Ereignis (verändert nach Gamma 2000)

- a) bei gegebener Grunddisposition und einer tiefen variablen Disposition wird trotz starkem Niederschlagsereignis kein Prozess ausgelöst
- b) bei hoher variabler Disposition reicht bereits ein mittleres Niederschlagsereignis, um einen Prozess auszulösen
- c) bei einer reduzierten variablen Disposition (durch einen bereits geschehenen Prozess) erfolgt trotz noch höherer Niederschläge im Vergleich zu b) keine Auslösung

2.5 Ausgewählte Geschiebe-Abschätzverfahren

Für die Abschätzung von Geschiebefrachten in Wildbächen stehen verschiedenste methodische Ansätze zur Verfügung. Eine Auswahl davon wird in diesem Kapitel überblicksmässig vorgestellt.

2.5.1 Wildbach-Klassifikationen

Bereits in den 1970er und 1980er Jahren wurden Anstrengungen unternommen, Wildbäche hinsichtlich ihrer „Gefährlichkeit“ einzustufen. Daraus resultierten verschiedene Klassifikations-Instrumente.

2.5.1.1 Wildbach-Klassifikation anlässlich der Beurteilung der Nationalstrasse N2

Anfangs 1970er Jahre wurde eine Expertenkommission für die Sicherheit der Nationalstrasse N2 im Kanton Uri eingesetzt, um die Wildbachverhältnisse im Urner Reusstal im Bereich der N2 zu beurteilen. Die Expertenkommission bestand aus Fachleuten der damaligen Eidg. Anstalt für das Forstliche Versuchswesen EAFV (heute WSL). Für diese Beurteilungen wurde ein einfaches Klassifikationssystem entwickelt (EAFV 1971). Darin werden in einer ersten Beurteilungstabelle die Vorgänge im Einzugsgebiet mittels Kriterien zum Wasserabfluss und Geschiebeabfluss beurteilt und gewichtet. In einer zweiten Beurteilungstabelle erfolgt eine Beurteilung des

Schwemmkegels nach ähnlichem Muster. Die beiden Beurteilungen werden anschliessend gemittelt und es erfolgt eine Einteilung der Wildbäche in eine von 4 Kategorien, welche die Gefährlichkeitsstufen der jeweiligen Wildbäche angeben.

2.5.1.2 Wildbach-Gefährlichkeits-Klassifikation nach Aulitzky

Aulitzky (1973) entwickelte eine zweigeteilte Wildbachklassifikation, bei welcher in einem ersten Teil anhand von verschiedenen Fragen zu „stummen Zeugen“ auf dem Schwemmkegel eine Bewertung des örtlichen Gefahrenausmasses mittels Bildung eines Wildbach-Index erfolgt. Der zweite Teil widmet sich der Wildbach-Charakteristik und der Art der zu erwartenden Wildbachtätigkeit. Dabei wird unterschieden zwischen murstossfähigen, geschiebeführenden und hochwasserführenden Wildbächen.

2.5.2 Einfache, empirische Abschätzverfahren

Die folgenden Ausführungen in Kap. 2.5.2.1 bis Kap. 2.5.2.5 stammen wörtlich aus Bertschi (2005). In der Arbeit von Bertschi wurden bekannte empirische Geschiebeabschätzmodelle auf Schweizer Verhältnisse angepasst und ihre unterschiedlichen Stärken und Schwächen aufgezeigt. Weiter wurden die für die einzelnen Modelle benötigten Inputdaten auf der Basis digital verfügbarer Daten abgeleitet. Das Endprodukt stellen Empfehlungen für die Herleitung der Parameter, für die Einstellung der Modelle sowie die Abgrenzung deren Einsatzbereiche dar.

2.5.2.1 Zeller

Das Modell nach Zeller (1985) besitzt neben einem wählbaren Koeffizienten nur einen variablen Parameter und stellt somit das einfachste Schätzverfahren dar. Die ihr zugrunde liegenden Daten entstammen weitgehend den Messungen der Versuchseinrichtung Alptal (Einzugsgebietsgrösse 0.75 km²), welche von der EAFV (Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen), bzw. heute der WSL (Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft) unterhalten wird.

$$V = K * E^{0.78} \quad (1)$$

V	Murenfracht [m ³]
K	Koeffizient [-]
E	Einzugsgebietsgrösse [km ²]

Für den wählbaren Koeffizienten gibt Zeller einen Einstellungsbereich von 17'000 ~ 27'000 vor.

2.5.2.2 Kronfellner-Kraus

Aufgrund der von Kronfellner-Kraus (1982) durchgeführten Analysen von grossen Feststofffrachten im österreichischen Alpenraum konnte ein Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsgrösse (als Mass für mögliche Hochwasserfrachten) und der in den Erosions- und Transportstrecken herrschenden Gefälleverhältnissen hergeleitet werden. Weiter wurde der Koeffizient K, welcher für die „torrentielle“ Wirksamkeit des Wildbaches zu definieren ist, eingefügt. Das Modell (2) wurde prinzipiell mit dem Ziel hergeleitet, mögliche extreme Feststofffrachten in Wildbächen ableiten zu können.

$$V = K * E * Jc \quad (2)$$

K	Koeffizient [-]
E	Einzugsgebietsgrösse [km ²]
Jc	Neigung des Hauptgerinnes [%]

Zu der Einstellung des Koeffizienten werden mehrere Vorschläge gemacht:

„Niedrige K-Werte (um 500) gelten für grosse, ausgeräumte, gut bewachsene Einzugsgebiete, hohe K-Werte (um 1500) für steile, kleine und mittlere Einzugsgebiete mit ausgedehnten Geschiebeherden und geringem oder anfälligem Bodenschutz.“ (Kronfellner-Kraus 1982)

Weiter wird ein rechnerischer Ansatz empfohlen, welcher den K-Wert über die Einzugsgebietsgrösse ableitet:

$$K = 1750/e^{0.018 * E} \quad (3)$$

Über die Jahre wurde das Modell regionalspezifisch, über den Koeffizienten K, dem österreichischen Alpenraum angepasst. Wie aus Kronfellner-Kraus (1987) zu entnehmen ist, wurden für diese regionale Anpassung die Daten von insgesamt 1'430 Ereignissen verwendet. [...].

Das Modell liefert einen Anhaltspunkt für das maximale Erosions- und Transportpotenzial von Wildbächen. Es wird ausdrücklich betont, dass auf die Einschätzung dieses Potenzials nach anderen Methoden auf keinen Fall verzichtet werden darf (Kronfellner-Kraus 1982).

2.5.2.3 D'Agostino Nr. 1

Das Modell Nr. 1 nach D'Agostino (1996) verfügt neben einem frei wählbaren Koeffizienten über drei Inputparameter, welche zu erheben sind. Konzeptionell ist das Modell von D'Agostino demjenigen von Kronfellner-Kraus (1982) nachempfunden. Das Modell wurde aufgrund von 62 Ereignissen, welche im östlichen Trentino in den Jahren 1882 bis 1995 stattgefunden haben, entwickelt und angepasst. Die Grösse dieser Einzugsgebiete liegt zwischen 0.08 – 82.6 km².

$$V = 45 * E^{0.9} * Jc^{1.5} * IG \quad (4)$$

E	Einzugsgebietsgrösse [km ²]
Jc	Neigung des Hauptgerinnes [%]
IG	Geologiefaktor [-]
45	Koeffizient, welcher zur Modellanpassung verwendet wird

Neben der Einzugsgebietsgrösse und der durchschnittlichen Neigung des Hauptgerinnes bezieht D'Agostino einen geologieabhängigen Parameter mit in das Modell ein. In den untersuchten Ereignissen konnten Zusammenhänge zur beitragenden Geologie festgestellt werden, weshalb ein geologieabhängiger Parameter (IG), der diesem Verhalten Rechnung tragen soll, definiert wurde (vgl. Tab. 2-2).

Tab. 2-2: Übersicht über die Zuweisung der Geologiefaktoren

Geologiefaktor	Geologie
IG = 5	Moränenbedeckung, Schotter, Rutschungsmassen
IG = 4	Metamorphite wie Phyllite, Schiefer
IG = 3	Klastische Gesteine wie Mergel, Sandsteine
IG = 2	Basalttuff, Brekzien, verwitterte Lavagesteine
IG = 1	Kalksteine
IG = 0	Porphyre, Granite, Diorite

2.5.2.4 D'Agostino Nr. 2

Das Modell Nr. 2 nach D'Agostino (1996) ist dem Modell D'Agostino Nr. 1 sehr ähnlich. Es wird einzig durch den Parameter Prozessfaktor ergänzt. Insgesamt werden drei Prozessarten unterschieden, diese können der Tab. 2-3 entnommen werden. Die zugrunde liegenden Daten sind dieselben wie bei Modell Nr. 1.

$$V = 39 * E * Jc^{1.5} * IG * IT^{-0.3} \quad (5)$$

E	Einzugsgebietsgrösse [km ²]
Jc	Neigung des Hauptgerinnes [%]
IG	Geologiefaktor [-]
IT	Prozessfaktor [-]
39	Koeffizient, welcher zur Modellanpassung verwendet wird

Tab. 2-3: Übersicht über die Zuweisung der Prozessfaktoren

Prozessfaktor	Prozess
IT = 1	debris flow (Murgang)
IT = 2	debris flood (murgangähnlicher Geschiebetrieb)
IT = 3	bedload (normaler Geschiebetrieb)

2.5.2.5 Hampel

Das Modell zur Schätzung der Murenfracht nach Hampel (1980) leitet sich aus gebietsspezifischen Faktoren (Niederschlag, Meereshöhe u.a.) und einem Abriebsfaktor ab:

$$V = \frac{4.47 * E * H_{100} * \Psi * \frac{H_u}{(1 - 2300) * (J - 1.23)^{2.63}}}{J * s^l} \quad (6)$$

E	Einzugsgebietsgrösse [km ²]
H ₁₀₀	100-jährlicher 24-Stundenniederschlag [mm]
Ψ	Abflussbeiwert [-]
H _u	Seehöhe des Talbodens im Bereich der Mündung [m]
J	Schwemmkegelgefälle [%]
s	Abriebskoeffizient [-]
l	Laufänge des Geschiebes von der Geschiebequelle bis zu dem Punkt am Schwemmkegel, an dem das Gefälle gemessen wurde [km]
4.47	Koeffizient, welcher zur Modellanpassung verwendet wird

Die Gleichung (6) von Hampel wurde aufgrund von 15 Murgangereignissen sowie Modellversuchen abgeleitet. In einer späteren Phase wurde sie an 120 Ereignissen in den Tiroler Alpen im Jahre 1977 getestet. Die Grundidee des Modells wird durch Hampel wie folgt beschrieben:

„Die Formel für die Murenfracht soll es ermöglichen, die Folgen jener mehr als hundertjährigen Wärmegewitter zu berechnen, die zur Ausbildung des Schwemmkegels führen. Der Grundgedanke war der, dass der Schwemmkegel die beste Auskunft über die Tätigkeit eines Wildbaches gibt und dass es mit Hilfe einer Formel, die den Geschiebeanteil am Wasserabfluss angibt, möglich sein müsste, diese Auskunft auch in Zahlen zu fassen. Man müsste die Hochwasserfracht mit diesem Geschiebeanteil multiplizieren, um die Geschiebefracht zu erhalten.“ (Hampel 1980)

2.5.2.6 Rickenmann

Rickenmann (1995) schlägt als Schätzformel für die Grössenordnung der bei einem Extremereignis zu erwartenden maximalen Murenfracht M folgende Formel vor:

$$M = (6.4 J_k \% - 23) L \quad \text{für } 7\% < J_k \leq 15\% \quad (7)$$

$$M = (110 - 2.5 J_k \%) L \quad \text{für } 15\% < J_k \leq 40\% \quad (8)$$

M Murenfracht [m^3]

J_k Kegelgefälle [%]

L Gerinnelänge vom potenziellen Anrisspunkt bis zum untersten Ablagerungspunkt [m]

Bei Vorhandensein längerer Felsstrecken kann die Gerinnelänge mit Erosion oder Feststoffeintrag kleiner sein. Bei der Ableitung der Schätzformel wurde jedoch die ganze Fließweglänge verwendet.

2.5.3 Abschätzverfahren mit Feldarbeit

Für Beurteilungen des Geschiebepotenzials und der Geschiebefracht im Rahmen der Erstellung von Gefahrenkarten oder als Dimensionierungsgrundlage für technische Massnahmen sind Methoden, welche Feldarbeit beinhalten, unumgänglich. Nur eine umfassende Geländeanalyse erfüllt den erforderlichen Detaillierungsgrad für eine solche Beurteilung und nur dann können die Koeffizienten und Faktoren der vorgängig aufgelisteten empirischen Formeln in engeren Grenzen abgeschätzt werden.

2.5.3.1 Methode Lehmann

Die Anwendung der Methode Lehmann ist in der Schweiz der Standard für eine feldbasierte Geschiebeabschätzung. Die Methode erlaubt eine Beurteilung des Geschiebepotenzials für Wildbäche bei einem 100 jährlichen Ereignis und entstand aufgrund der Unwetteranalyse 1987 anhand von Ereignisrekonstruktionen von ca. 20 ausgewählten Wildbächen (Lehmann 1993). Sie wurde später als Verfahren für Fachleute veröffentlicht (Spreafico et al. 1996).

Das Verfahren sieht drei Hauptarbeitsschritte vor:

Vorarbeiten

Nach der Beschaffung, dem Studium und einer ersten Interpretation von Unterlagen (Karten, Luftbilder, Informationen zur Geologie, Hydrologie, Ereignisgeschichte etc.) erfolgt eine erste Beurteilung des Wildbaches. Dabei wird das Einzugsgebiet einer Wildbachkategorie zur Murfähigkeit und allfälligen Ablagerungsmöglichkeiten zugeordnet. Mittels eines Entscheidungsbaums, der grob die Prozesse im Einzugsgebiet charakterisiert (vgl. Abb. 2-4), wird rein qualitativ die spezifische Feststofffracht bestimmt und mittels Einbezug der Geologie und der Einzugsgebietsfläche (vgl. Abb. 2-5) dann zu einer groben quantitativen Abschätzung berechnet. Zusätzlich wird die massgebende Hochwasserspitze und Abflussganglinie abgeschätzt.

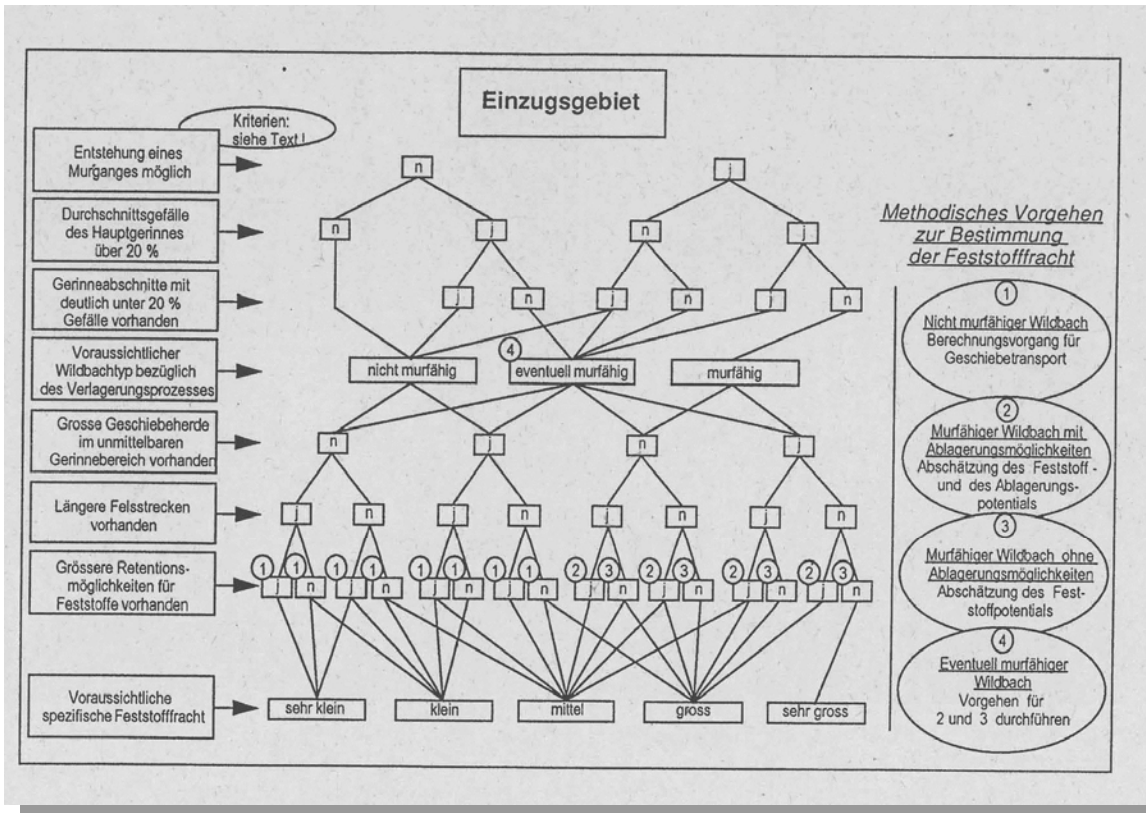


Abb. 2-4: Entscheidungsbaum zur Erstbeurteilung (Spreafico et al. 1996)

Spez. Fracht	Molasse	Flysch	Kalk	Kristallin
m ³ /km ²	10 km ² - 1 km ²		10 km ² - 1 km ²	10 km ² - 1 km ²
sehr klein	20 - 100	150	200 - 800	400 - 3'000
klein	50 - 200	1'500	500 - 1'000	800 - 5'000
mittel	150 - 500	5'000	1'000 - 5'000	1'500 - 15'000
gross	500 - 1'500	10'000	2'000 - 10'000	3'000 - 30'000
sehr gross	(800 - 3'000)	20'000	3'000 - 30'000	8'000 - 80'000

Abb. 2-5: Spezifische Feststofffracht eines grossen Wildbachereignisses in Abhängigkeit von der Geologie und der Einzugsgebietsgrösse (Spreafico et al. 1996)

Feldaufnahmen

Während den detaillierten Feldaufnahmen erfolgt zuerst die Überprüfung der Ergebnisse aus den Vorarbeiten, insbesondere der Abklärung der Murfähigkeit. Die anschliessende Abschätzung des mobilisierbaren Feststoffpotenzials aus der Sohle, den Böschungen und aus seitli-

chen Geschiebeherden sowie die Abschätzung des Ablagerungspotenzials in Umlagerungs- und Ablagerungsstrecken bilden den Kernpunkt dieses Arbeitsschritts. Dazu werden homogene Gerinneabschnitte gebildet und einzeln beurteilt. Als Faustformeln zur quantitativen Abschätzung der Geschiebemobilisierung im Gerinne wird beim Transportprozess Geschiebetrieb von einer maximalen Eintiefung von 1/12 bis 1/10 der Gerinnebreite, bei Murgang von 1/5 bis 1/3 der Gerinnebreite, ausgegangen. Für die Mobilisierung aus den Böschungen werden Erfahrungswerte in Abhängigkeit des Materials gegeben. Neben diesen Abschätzungen des mobilisierbaren Geschiebepotenzials werden bei nicht murfähigen Gerinnen ergänzende Querprofil- und Linienzahl-Aufnahmen gemacht.

Auswertungen der Feldaufnahmen

Bei nicht murfähigen Wildbächen wird für die aufgenommenen Querprofile mittels den Formeln nach Smart & Jäggi (1983) (vgl. Kap. 2.5.5.1) oder Rickenmann (1990) (vgl. Kap. 2.5.5.2) für jeden Gerinneabschnitt die Transportkapazität und schliesslich die Feststoffbilanz berechnet und bis zum Kegelhals aufsummiert. Bei murfähigen Wildbächen erfolgt pro Gerinneabschnitt die Berechnung des Feststoffpotenzials und/oder des allfälligen Ablagerungspotenzials. Anschliessend werden diese Bilanzen bis zum Kegelhals aufsummiert. Plausibilisierungskontrollen und Sensitivitätsanalysen schliessen die Auswertungen ab.

2.5.3.2 Methode SEDEX

Die Methode SEDEX (SEDiments and EXperts) wurde am Geographischen Institut der Universität Bern entwickelt. „SEDEX, ist eine praxistaugliche Methodik zur Beurteilung der Feststofflieferung in Wildbächen“ (Frick et al. 2007). SEDEX bildet eine Weiterentwicklung und Optimierung bestehender Feldmethoden an heutige Bedürfnisse der Wildbach-Gefahrenbeurteilung.

Grundlage von SEDEX ist das sog. Baustein-Prinzip, bei dem ein Wildbach in homogene Abschnitte eingeteilt wird. Pro Abschnitt werden das Gerinne, die beidseitigen Böschungen und Hänge je einem der 12 verfügbaren Bausteine zugeordnet. Nach der Bestimmung der Bausteine erfolgt im Gelände die Bestimmung der Aktivierungswahrscheinlichkeit pro Baustein anhand von Aktivierungs-Checklisten. Die anschliessende Abschätzung der Feststofflieferung erfolgt nach den gleichen Grundsätzen wie bei der Methode Lehmann, jedoch werden nur in Umlagerungsstrecken Berechnungen zu Transportraten von Geschiebe gemacht.

Wichtige Neuerungen von SEDEX wurden durch Erkenntnisse aus Experten-Workshops zu fachlichen Ergänzungen und arbeitstechnischen Anliegen entwickelt. Dazu gehören (Frick et al. 2007):

- Bessere Nachvollziehbarkeit der für die Feststofflieferung und Ereignisabläufe entscheidenden Bausteine
- Mitbewertung der Unsicherheiten
- Auch für häufige und sehr seltene Ereignisse (30-jährlich, 300-jährlich) können Aussagen systematisch abschnittsweise hergeleitet werden
- Verbesserung der Qualität der Resultate durch strukturiertes Vorgehen
- Datenerfassung mittels Kleincomputer im Feld möglich
- Erhöhte Transparenz durch Vorgehen nach einer klar definierten Beurteilungssystematik
- Visualisierungsmöglichkeit durch automatische Generierung von Tabellen und Grafiken
- Bessere Vergleichbarkeit von Gutachten verschiedener Bearbeiter durch einheitliches Vorgehen

2.5.4 GIS-basierte Abschätzverfahren

Die in Heinimann et al. (1998) und in Zimmermann et al. (1997) vorgestellte GIS-basierte Methodik zur Abschätzung der Wildbachgefahren wurde von der Geo7 AG in Bern entwickelt. Durch Abfragen von bestehenden digitalen Datensätzen wie DHM, Bodenbedeckung und Optimierungen dieser Datensätze durch zusätzliche Informationen (Runsennetz, Geologie) wird eine Beurteilung innerhalb des Einzugsgebiets bezüglich Abflussbildung und geschieberelevante Flächen im Hang, sowie der Gerinneprozesse gemacht (vgl. Abb. 2-6). Das Ergebnis dieser Beurteilung innerhalb des Einzugsgebiets ist einerseits die Herleitung einer gewichteten geschieberelevanten Fläche, andererseits werden Angaben zum relevanten Geschiebetransportprozess, dessen Reichweite und Wirkung auf dem Kegel geliefert.

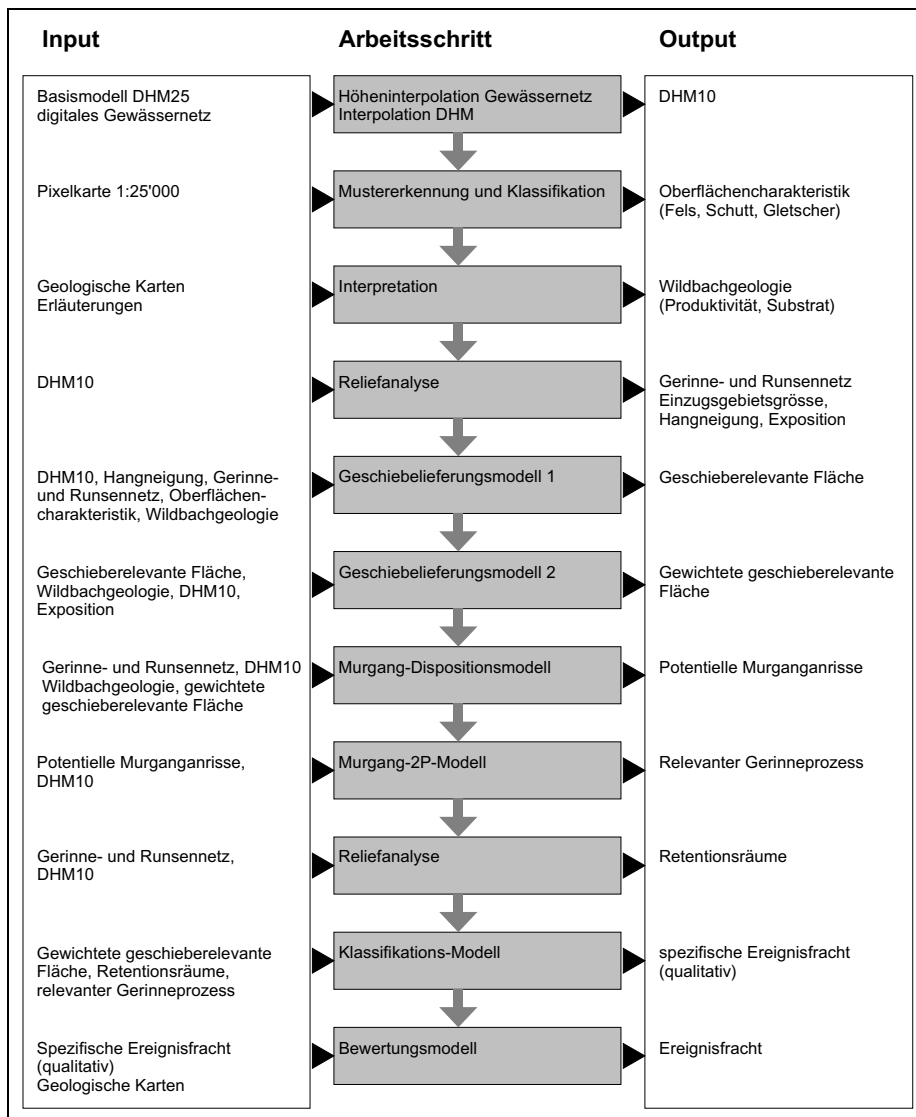


Abb. 2-6: Verfahren zur Abschätzung der Feststofffracht mit Hilfe eines GIS (Geo7 1997)

Die anschliessende Quantifizierung und Abschätzung einer Geschiebefracht erfolgt auf Stufe Einzugsgebiet. Das entwickelte Verfahren orientiert sich am Vorgehen in Spreafico et al. (1996) bei der Erstbeurteilung im Rahmen der Vorarbeiten (vgl. Kap. 2.5.3.1). Die notwendigen Parameter für die Entscheidungsfindung im Entscheidungsbaum (vgl. Abb. 2-4) können aus der GIS-basierten Beurteilung innerhalb des Einzugsgebiets abgeleitet werden. Die gewichtete geschie-

berelevante Fläche wird ebenfalls in die Beurteilung integriert. Das Ergebnis dieser Beurteilung ist eine qualitative Angabe zur voraussichtlichen spezifischen Feststofffracht, welche analog zum Verfahren beschrieben in Spreafico et al. (1996) durch Einbezug der Einzugsgebietsfläche und Geologie in eine quantitative Abschätzung überführt wird (vgl. Abb. 2-5).

2.5.5 Physikalische Abschätzformeln für Geschiebetransportraten

Zur Abschätzung von Geschiebetransportraten in steileren Gewässern, wurden für den Prozess Geschiebetrieb mittels Laborversuchen verschiedene Abschätzformeln entwickelt:

2.5.5.1 Formel nach Smart/Jäggi

Smart & Jäggi (1983) führten auf der Basis von Arbeiten durch Meyer-Peter & Müller (1948) Laborversuche in Fließgewässern mit steileren Gefällen im Bereich von 3 bis 20% durch. Die Versuche wurden mit natürlichen Sohlen durchgeführt und es konnte eine Formel abgeleitet werden, welche die Transportrate hauptsächlich vom Abfluss und Gefälle abhängig macht.

$$q_b = \frac{4}{s-1} * \left[\frac{d_{90}}{d_{30}} \right]^{0.2} * q * J^{1.6} * \left[1 - \frac{\theta_{cr} * (s-1) * d_m}{h_m * J} \right] \quad (9)$$

q_b	spezifische Feststofftransportrate [$m^3/s*m$]
s	relative Dichte des Feststoffes zum Wasser [-]
d_{90}, d_{50}, d_{30}	charakteristische Korngrößen ($d_x = x$ % des Sohlenmaterials sind kleiner) [m]
q	spezifischer Reinwasser-Abfluss [$m^3/s*m$]
J	Sohlengefälle [tan]
θ_{cr}	kritischer Shieldsfaktor beim Transportbeginn (kann mit 0.05 angenommen werden)
d_m	mittlere Korngrösse (entspricht etwa dem d_{50}) [m]
h_m	Höhe des Feststoff-Wassergemischs [m]

2.5.5.2 Formel nach Rickenmann

Auch Rickenmann (1990) führte Laborversuche zum Geschiebetransport von steileren Gerinnen mit Gefällen zwischen 1 und 20% durch. Im Vergleich zu Smart & Jäggi (1983) passte er die Dichte und Zähigkeit stärker den realen Bedingungen eines Wildbachs an, indem er anstelle von Reinwasser eine Ton-Suspension als Transportmittel verwendete.

$$q_{cr} = 0.065 * (s-1)^{1.67} * g^{0.5} * d_{50}^{1.5} * J^{-1.12} \quad (10)$$

$$q_b = \frac{12.6}{(s-1)^{1.6}} * \left[\frac{d_{90}}{d_{30}} \right]^{0.2} * (q - q_{cr}) * J^{2.0} \quad (11)$$

q_{cr}	kritischer Abfluss bei Transportbeginn [m^3/s]
s	relative Dichte des Feststoffes zum Wasser [-]
g	9.81 [m/s^2]
d_{90}, d_{50}, d_{30}	charakteristische Korngrößen ($d_x = x$ % des Sohlenmaterials sind kleiner) [m]
q_b	spezifische Feststofftransportrate [$m^3/s*m$]
J	Sohlengefälle [tan]
q	spezifischer Reinwasser-Abfluss [$m^3/s*m$]

In der daraus abgeleiteten Formel zur Abschätzung der Transportrate erfolgt ein zweistufiges Vorgehen. In einem ersten Schritt wird der kritische Abfluss q_{cr} bei Transportbeginn berechnet (10), danach erfolgt die Berechnung der spezifischen Geschiebetransportrate (11).

Als Fazit der physikalischen Abschätzformeln kann folgender Aspekt angefügt werden: Vergleiche der gemessenen Transportraten mit den mittels obiger Formeln berechneten Transportraten zeigten (nach Hegg und Rickenmann 2000), dass die tatsächlichen im Gelände beobachteten Transportraten im Vergleich mit den im Labor entwickelten Formeln bei steilen Gerinnen oftmals kleinere Werte aufwiesen. Die Gründe dafür liegen in den Laborbedingungen (keine Kurven, glatte Wände), welche im Vergleich zu realen Wildbachgerinnen (Kurven, Geometrieveränderungen, Rauigkeitselemente wie Baumstämme, grobe Blöcke, Step-Pool-Abfolgen) weniger Energieverluste zu verzeichnen haben. Hinzu kommt, dass Wildbäche im Vergleich zu flacheren Talgewässern während Geschiebetransport oft nicht abflusslimitiert sind, sondern sedimentlimitiert. Diese sedimentlimitierten Bedingungen werden bei den Formeln zu Transportraten in Wildbächen nicht berücksichtigt und die Berechnungen sind somit eher als obere Grenzen möglicher Transportraten anzusehen.

Die aktuelle Grundlagenforschung an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft WSL zielt u.a. auch darauf ab, neue Erkenntnisse zu diesen Energieverlusten durch Fließwiderstände im Gerinne zu erlangen (Nitsche 2009 (in Arbeit)).

2.5.6 Zusammenfassung der bestehenden Verfahren und Fazit für die Praxis

2.5.6.1 Zusammenfassung

Tab. 2-4 gibt einen Überblick über alle vorgestellten Geschiebe-Abschätzverfahren hinsichtlich der Kalibrierung, notwendigen Inputdaten, benötigter Zeitaufwand und Aussagekraft. Dabei wurde die Aussagekraft der Methoden anhand von 3 Stufen abgeschätzt.

- **Überblick-Stufe:** Die Aussagekraft der Geschiebeabschätzung liegt auf einem niedrigen Niveau und ist aufgrund starker Generalisierung der Prozesse auf Einzugsgebietsebene nur als ein genereller Wert anzusehen, welcher der Individualität eines Wildbacheinzugsgebiets keine Rechnung trägt.
- **Gefahrenhinweis-Stufe:** Die Aussagekraft der Geschiebeabschätzung liegt auf einem mittleren Niveau. Die Prozesse und der Betrachtungsmassstab liegen im Bereich der Einzugsgebietsebene, wobei die Individualität eines Wildbacheinzugsgebiets berücksichtigt wird.
- **Gefahrenkarten-Stufe:** Die Aussagekraft der Geschiebeabschätzung liegt auf einem hohen Niveau. Die Prozesse und der Betrachtungsmassstab sind detaillierter als bei der Gefahrenhinweis-Stufe, indem sie sich auf einer tieferen Skala, nämlich auf Gerinneabschnittsebene abspielen. Der Individualität eines Wildbacheinzugsgebiets wird dadurch besondere Beachtung geschenkt.

Tab. 2-4: Kalibrierung, Inputdaten, Zeitaufwand und Aussagekraft der ausgewählten Abschätzverfahren

	Verfahren	Kalibrierung für die Entwicklung des Abschätzverfahrens	Notwendige Inputdaten	Zeitlicher Aufwand für Beurteilung pro Wildbach * Angabe in Quelle ** eigene Abschätzung	Aussagekraft: • Stufe: Ü = Überblick, GHK = Gefahrenhinweiskarte GK = Gefahrenkarte • Jährlichkeit: 30, 100, 300, EHQ • Transportprozess: GT = Geschiebetrieb MG = Murgang
Klassifikationen	Expertenkommission N2 (EAFV 1971) (Kap. 2.5.1.1)	Nicht bekannt	Geländeaufnahmen auf Schwemmkegel und im Einzugsgebiet	** 1 Tag	<ul style="list-style-type: none"> • GHK bis GK • 100 bis 300 • GT und MG
	Aulitzky (1973) (Kap. 2.5.1.2)	Nicht bekannt	Geländeaufnahmen auf Schwemmkegel und im Einzugsgebiet	** 1 Tag	<ul style="list-style-type: none"> • GHK • 100 bis 300 • GT und MG
Einfache, empirische Abschätzverfahren	Zeller (Kap. 2.5.2.1)	Messungen im Erlenbach, Alptal	EG-Fläche	**10 Min	<ul style="list-style-type: none"> • Ü • EHQ • MG
	Kronfellner-Kraus (1982) (Kap. 2.5.2.2)	Vielzahl an Grossereignissen im österreichischen Alpenraum	EG-Fläche Mittleres Gefälle des Hauptgerinnes	** 30 Min	<ul style="list-style-type: none"> • Ü • 300 bis EHQ • MG
	D'Agostino 1 (1996) (Kap. 2.5.2.3)	62 Ereignisse im östlichen Trentino	EG-Fläche, Mittleres Gefälle Hauptgerinne, Geologiefaktor	** 30 Min	<ul style="list-style-type: none"> • Ü • 300 bis EHQ • ?
	D'Agostino 2 (1996) (Kap. 2.5.2.4)	62 Ereignisse im östlichen Trentino	EG-Fläche, Mittleres Gefälle Hauptgerinne, Geologiefaktor, Prozessfaktor	**30 Min	<ul style="list-style-type: none"> • Ü • 300 bis EHQ • GT und MG
	Hampel (1980) (Kap. 2.5.2.5)	15 Murgangereignisse und Modellversuche, Eichung an 120 Ereignissen	EG-Fläche, 100 j. Stunden-niederschlag, Abflussbeiwert, Seehöhe Talboden, Abriebskoeffizient, Lauflänge der Geschiebes	** 2 Std	<ul style="list-style-type: none"> • Ü • 300 bis EHQ • MG
	Rickenmann (1995) (Kap. 2.5.2.6)	Nicht bekannt	Kegelgefälle, Gerinnelänge vom potenziellen Anrisspunkt bis untersten Ablagerungspunkt	** 30 Min	<ul style="list-style-type: none"> • Ü • 300 bis EHQ • MG
Feldmethoden	Lehmann (1993) (Kap. 2.5.3.1)	Analyse von ca. 20 Ereignissen der Unwetter 1987	Umfangreiche Vorarbeiten, Geländeaufnahmen und Auswertungen	**"ca. 5 Tage"	<ul style="list-style-type: none"> • GK • 100 • GT und MG
	SEDEX (2007) (Kap. 2.5.3.2)	Experten-Workshops, theoretische Grundlagen	Umfangreiche Vorarbeiten, Geländeaufnahmen und Auswertungen	**"≤ bestehende Methoden"	<ul style="list-style-type: none"> • GK • 30, 100, 300 • GT und MG
GIS-basiert	GIS Geo7 (1997) (Kap. 2.5.4)	Einzelne Arbeitsschritte an mehreren Ereignissen, sonst theoretische Grundlagen	Digitale Inputdaten zu Relief, Gewässernetz, Bodenbedeckung, Geologie	** 2 Std.	<ul style="list-style-type: none"> • GHK • 100 • GT und MG
Physikalisch	Smart& Jäggi (1983) (Kap. 2.5.5.1)	Laborversuche	Relative Dichte, Korngrößenverteilung, spez. Abfluss, Sohlgefälle, Höhe des Feststoff-Wassergemischs	-	<ul style="list-style-type: none"> • GK • 30, 100, 300, EHQ • GT
	Rickenmann (1990) (Kap. 2.5.5.2)	Laborversuche	Kritischer Abfluss, relative Dichte, Korngrößenverteilung, Sohlgefälle, spez. Reinwasser-Abfluss	-	<ul style="list-style-type: none"> • GK • 30, 100, 300, EHQ • GT

Beim Vergleich der Aussagekraft mit dem benötigten Zeitaufwand aller hier vorgestellter Geschiebe-Abschätzverfahren zeigt sich, dass je weniger zeitintensiv ein Abschätzverfahren ist, umso kleiner die Aussagekraft ist. Die einfachen empirischen Abschätzverfahren bilden nur eine überblicksmässige Beurteilung von Extremereignissen und vermögen durch ihre starke Generalisierung infolge sehr einfacher Inputdaten die Verhältnisse nur äusserst grob zu beschreiben. Besser schneiden die Wildbach-Klassifizierungs-Methoden sowie die GIS-basierte Methode von Geo7 ab. Sie beanspruchen deutlich mehr Zeit als die empirischen Abschätzverfahren, liefern jedoch Informationen zu den Geschiebefrachten, die der Individualität jedes Wildbachsystems besser gerecht werden. Die zeitintensivsten Methoden mit detaillierten Vorarbeiten und Geländearbeiten (Methode Lehmann und SEDEX) geben auch die aussagekräftigsten Resultate.

Bei der Betrachtung der Entwicklung/Kalibrierung obiger Geschiebe-Abschätzverfahren fällt auf, dass die meisten empirischen Abschätzverfahren aufgrund von umfangreichen Analysen von Ereignissen und dabei gelieferten Geschiebefrachten auf der Einzugsgebietsebene kalibriert und dadurch verbessert wurden.

Bei den aussagekräftigen Abschätzverfahren mittels Klassierungsmethoden (Expertenkommission N2, Aulitzky), GIS (Geo7) oder Feldarbeit (Lehmann, SEDEX) wurden ausser bei der Methode Lehmann und teilweise bei der Methode GIS-Geo7 vorwiegend theoretische Überlegungen oder Erfahrungswerte von Experten in die Entwicklung integriert, jedoch keine konkret abgelaufene Ereignisse. Die Methode Lehmann wurde an rund 20 Ereignissen aus dem Jahr 1987 entwickelt. An zusätzlichen Ereignissen wurden die Verfahren nicht getestet, weshalb keine Angaben vorhanden sind, wie die Güte dieser Abschätzungen einzuschätzen ist.

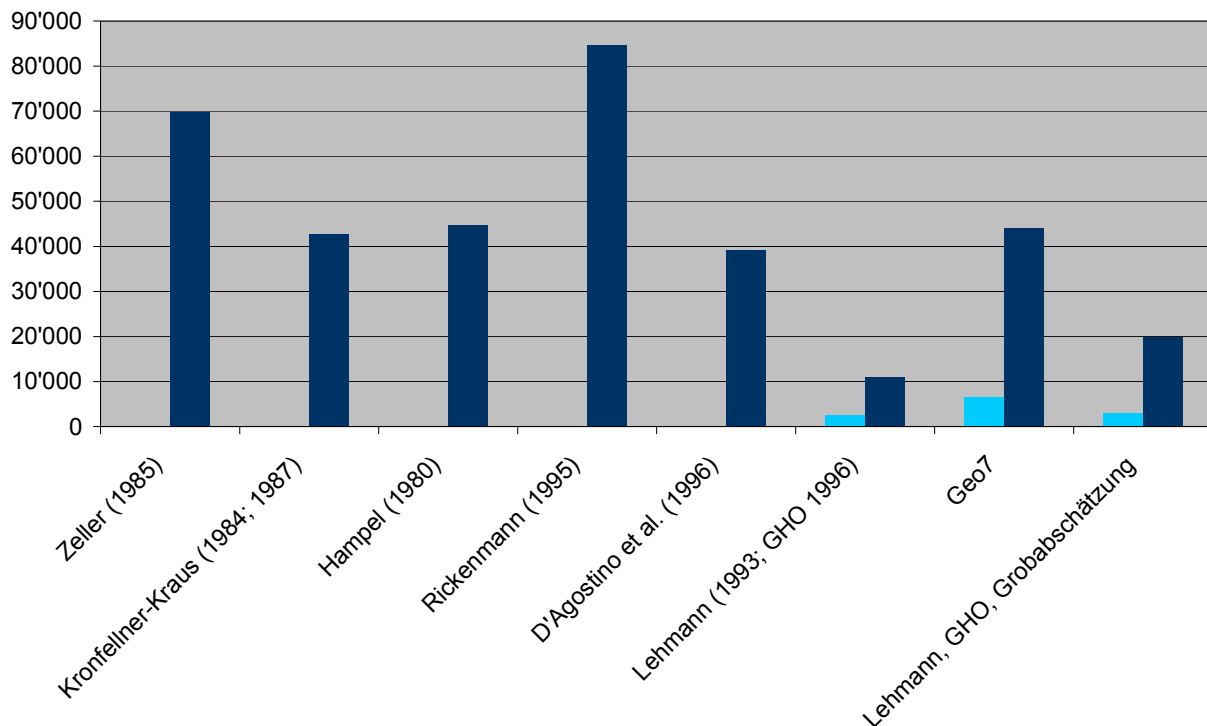


Abb. 2-7: Resultate der vergleichenden Anwendung von Geschiebeabschätzverfahren im Steinibach LU (eigene Darstellung nach Zimmermann und Lehmann 1999)

Zimmermann und Lehmann (1999) testeten am Steinibach, Flühli, LU die verschiedenen Verfahren (vgl. Abb. 2-7) nach Zeller (1985), Kronfellner-Kraus (1984, 1987), Hampel (1980), Rickenmann (1995), D'Agostino et al. (1996), Lehmann (1993) resp. Spreafico et al. (1996) detail-

liert, GIS-basierter Ansatz Geo7 aus Heinemann et al. (1998) und Lehmann (1993) resp. Spreafico et al. (1996) Erstabschätzung. Bei der Methode Lehmann (1993) und Geo7 wurden sowohl ein Szenario mit Murgangtransport als auch eines mit Geschiebetrieb berechnet, weshalb im Diagramm in Abb. 2-7 zwei Säulen dargestellt sind.

Die dabei erhaltenen Werte (vgl. Abb. 2-7) schwankten zwischen 2'500 und 85'000 m³, was einem Faktor von 34 entspricht. Noch grösser wäre die Diskrepanz der Ergebnisse gewesen, wenn die verschiedenen Ermessensspielräume berücksichtigt worden wären, die sich dem Gutachter bei der Anwendung der verschiedenen Verfahren ermöglichen.

2.5.6.2 Fazit

Die Untersuchungen von Zimmermann und Lehmann (1999) zeigen auf eindrückliche Art und Weise, dass trotz bestehender Abschätzverfahren grosse Unsicherheiten im Umgang mit der Abschätzung von Geschiebefrachten in Wildbächen bestehen. Als Schlussfazit führen die Autoren an:

„Die Beschäftigung mit dem Geschiebe in einem Wildbach setzt gute Kenntnisse der Prozesse und Zusammenhänge voraus. Auch wenn heute eine grössere Zahl von Verfahren zur Schätzung von Geschiebefrachten und von Geschiebetransport existiert, so bleibt ein wesentlicher Ermessensspielraum bestehen. Dieser kann mit zunehmender Erfahrung zwar nicht ausgeschaltet werden. Mit gut ausgebildetem Prozessverständnis kann aber die Qualität der Ergebnisse deutlich erhöht werden. Je einfacher die Verfahren sind, desto grösser muss die Vorsicht bei deren Anwendung sein. Verwendet man für Fragestellungen, bei welchen eine Abschätzung der Grössenordnung genügt, die wenig aufwendigen Verfahren, sollte nie nur ein einzelnes Verfahren angewendet werden. Je besser fundiert die Ergebnisse sein müssen, desto aufwendiger werden die durchzuführenden Arbeiten (Geländearbeit).“ (Zimmermann und Lehmann 1999)

In der Schweiz werden Gefahrenkartierungen und dabei auch Geschiebeabschätzungen von privaten Büros im Auftrag der öffentlichen Hand unter marktwirtschaftlichen Bedingungen erstellt. Dies führt zu einem Konkurrenzkampf und tiefen Preisen und somit zu sehr beschränkten Zeitbudgets, welche für die Beurteilungen und insbesondere für die Geländearbeiten eingesetzt werden. Aussagekräftige Methoden mittels Feldmethodik werden zwar angewendet, aus finanziellen Gründen jedoch meist abgekürzt. Ungeachtet davon, ob das marktwirtschaftliche System gut für die Qualität von Gefahrenbeurteilungen ist, wird klar, dass der Bedarf der Praxis an Abschätzverfahren, welche mit einem angemessenen Zeitaufwand möglichst gute Resultate liefern, sehr gross ist.

Als Fazit und bei einer ehrlichen Betrachtung kann gesagt werden, dass Abschätzverfahren für die Gefahrenhinweis- und die Gefahrenkarten-Stufe, die auf einer Vielzahl detaillierter Ereignisanalysen basieren, auf ihre Güte hin getestet wurden und in einem realistischen Zeitbudget durchgeführt werden können, praktisch nicht vorhanden sind.

Ein Teil dieser Lücke, nämlich die Entwicklung Abschätzverfahrens von Grossereignissen ≥ 100 jährlich, soll durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden.

3 Methodik

3.1 Überblick

Abb. 3-1 zeigt einen Überblick über das in dieser Arbeit angewandte Vorgehen:

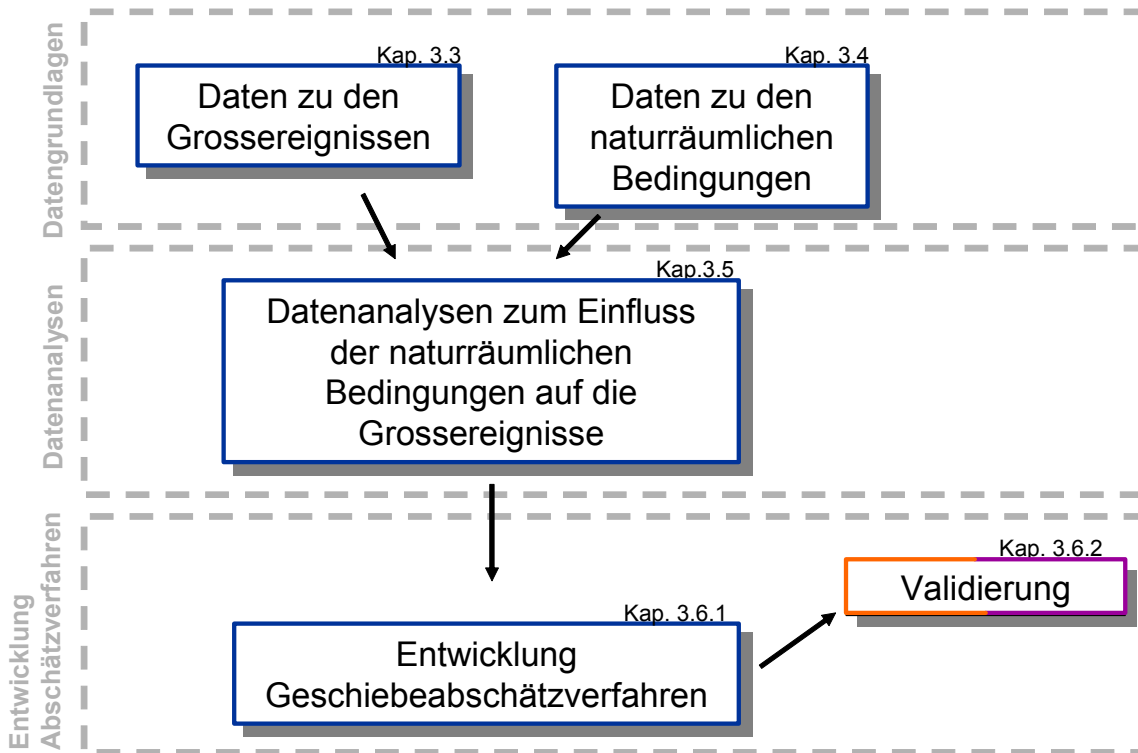


Abb. 3-1: Überblick Methodik

Die Datengrundlagen dieser Arbeit bestehen einerseits aus detaillierten Informationen zum Geschiebehaushalt während 58 abgelaufenen Grossereignissen in 58 Wildbacheinzugsgebieten (vgl. Kap. 3.3). Andererseits wurden digitale Grundlagendaten zu den naturräumlichen Bedingungen in diesen Einzugsgebieten erhoben, wie beispielsweise Informationen zum Relief, zur Morphometrie, Geologie oder Bodenbedeckung (vgl. Kap. 3.4).

In den Datenanalysen wurden Zusammenhänge zwischen den gegebenen naturräumlichen Bedingungen und den Ereignisabläufen inklusive den daran beteiligten Geschiebeprozessen qualitativ und quantitativ analysiert. Das Ziel bestand darin, die massgebenden natürlichen Einflussfaktoren zu identifizieren und deren Einfluss zu quantifizieren. Dadurch sollten allgemeingültige Schwellenwerte und Grenzwerte definiert werden, die Anhaltspunkte für eine quantitative Geschiebeabschätzung geben (vgl. Kap. 3.5).

Anhand dieser Erkenntnisse wurde anschliessend ein Geschiebeabschätzverfahren entwickelt (vgl. Kap. 3.6.1). Dieses wurde umfassend validiert und auf die Sensibilität hin getestet (vgl. Kap. 3.6.2).

3.2 Auswahl der Stichprobe

Für das oben dargestellte Vorgehen wurden geeignete Untersuchungsgebiete ausgewählt. Die Auswahl erfolgte kontinuierlich während der Projektzeit, so dass aktuell ablaufende Grossereignisse integriert werden konnten.

Die ausgewählten Untersuchungsgebiete können in zwei Hauptgruppen unterteilt werden:

Analysegebiete (verwendet in den Abläufen der blauen Kästen in Abb. 3-1)

- 58 Wildbacheinzugsgebiete mit abgelaufenem Grossereignis wurden als Stichprobe für die Analysen für ein besseres Prozessverständnis sowie zur Entwicklung des Geschiebeabschätzverfahrens gemäss Zielsetzung (vgl. Kap.1.1) ausgewählt.

Validierungsgebiete (verwendet im orange-violetten Kasten in Abb. 3-1)

- 43 Wildbacheinzugsgebiete wurden als unabhängige Datengrundlage für die Validierung des mittels Daten der Analysegebiete entwickelten Geschiebeabschätzverfahrens ausgewählt. Die Validierungsgebiete lassen sich in 2 Gruppen teilen. Bei 20 Einzugsgebieten erfolgte die Validierung anhand eines abgelaufenen Grossereignisses (Ereignis-Validierungsgebiete). Die restlichen 23 Einzugsgebieten wurden anhand von Geschiebeabschätzung im Rahmen von Gefahrenbeurteilungen validiert (Abschätzungs-Validierungsgebiete) (vgl. Kap.3.6.2).

Tab. 3-1 gibt einen Überblick über Zweck, Quellen für die Auswahl, Auswahlkriterien und Anzahl Einzugsgebiete der Analyse- und Validierungsgebiete.

Eine Karte mit der Lage der ausgewählten Gebiete sowie eine umfassende Tabelle mit den wichtigsten Kennzahlen der einzelnen Gebiete ist in Kap. 4 ersichtlich.

Tab. 3-1: Zweck, Quellen, Auswahlkriterien und Anzahl der Analyse- und Validierungsgebiete

	Analysegebiete	Validierungsgebiete		
	Analysegebiete	Ereignis-Validierungsgebiete	Abschätzungs-Validierungsgebiete	
Zweck	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung des Prozessverständnisses • Entwicklung des Geschiebeabschätzverfahrens 	<ul style="list-style-type: none"> • Validierung des Geschiebeabschätzverfahrens 	<ul style="list-style-type: none"> • Validierung des Geschiebeabschätzverfahrens 	
Quellen für die Auswahl	<ul style="list-style-type: none"> • Unwetterdatenbank WSL (Hilker et al. 2008) • Datenbank StorMe des BAFU • Publikationen zu Ereignisanalysen (BWW, GIUB 1990) (BWW 1990) (BWW 1998) (BWG 2002) (Bezzola und Hegg 2007) • Befragungen von Experten bei kantonalen Fachstellen und privaten Büros • Medienberichte 	<ul style="list-style-type: none"> • Unwetterdatenbank WSL (Hilker et al. 2008) • Datenbank StorMe des BAFU • Publikationen zu Ereignisanalysen (BWW, GIUB 1990) (BWW 1990) (BWW 1998) (BWG 2002) (Bezzola und Hegg 2007) • Befragungen von Experten bei kantonalen Fachstellen und privaten Büros • Medienberichte 	<ul style="list-style-type: none"> • Kantonale Ämter: Stand der Gefahrenkartierungen Wasserprozesse in den verschiedenen Gemeinden 	
Bedingungen für Auswahl	generell	<ul style="list-style-type: none"> • Einzugsgebietsfläche möglichst kleiner als 12 km² • Gut dokumentiertes abgelaufenes Grossereignis vorhanden, Zeitpunkt möglichst aktuell oder in den letzten 20 Jahren • Möglichst heterogene Ereignisabläufe und Prozesse bei den verschiedenen Grossereignissen • Möglichst wenige Schutzbauten in den Einzugsgebieten, welche die Grossereignisse beeinflusst haben • Möglichst gute regionale Abdeckung des Schweizer Alpenraums 	<ul style="list-style-type: none"> • Einzugsgebietsfläche möglichst kleiner als 12 km² • Gut dokumentiertes abgelaufenes Grossereignis vorhanden, Zeitpunkt möglichst aktuell oder in den letzten 20 Jahren • Möglichst heterogene Ereignisabläufe und Prozesse bei den verschiedenen Grossereignissen • Möglichst wenige Schutzbauten in den Einzugsgebieten, welche die Grossereignisse beeinflusst haben • Möglichst gute regionale Abdeckung des Schweizer Alpenraums 	<ul style="list-style-type: none"> • Einzugsgebietsfläche möglichst kleiner als 12 km² • Gefahrenbeurteilung mit detaillierten Geschiebeabschätzungen vorhanden • Möglichst wenige Schutzbauten in den Einzugsgebieten, welche Grossereignisse beeinflussen können
	Minimaler Detaillierungsgrad der Dokumentation	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitative Angaben zu den abgelaufenen Geschiebeprozessen während dem Grossereignis • Quantitative Geschiebebilanzen zum abgelaufenen Grossereignis mit Detaillierungsgrad mindestens auf <u>Gerinneabschnittsebene</u> (= Geschiebebilanz pro Gerinneabschnitt) • Wenn möglich Angaben zum Ereignisniederschlag • Wenn möglich Angaben zum Abfluss • Wenn möglich Angaben zu früheren Ereignissen 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitative Angaben zu den abgelaufenen Geschiebeprozessen während dem Grossereignis • Geschiebebilanzen zum abgelaufenen Grossereignis mit Detaillierungsgrad mindestens auf <u>Einzugsgebietsebene</u> (= Geschiebefracht am Kegelhals) 	<ul style="list-style-type: none"> • Abschätzung der Geschiebefracht bei einem 100 jährlichen und bei einem 300 jährlichen Ereignis vorhanden • Wenn möglich Angaben zu den dabei verwendeten Ereignisszenarien in den Technischen Berichten vorhanden
Anzahl	58	20	23	

3.3 Daten zu den Grossereignissen in den Analysegebieten

3.3.1 Niederschlagsanalysen

Wo nicht schon vorhanden, wurden für alle Grossereignisse der Analyseebäche Niederschlagsanalysen erstellt. Das Ziel dabei war, Informationen über die Vorfeuchte, den Ereignisniederschlag und eine Abschätzung der Jährlichkeit des Niederschlaginputs zu gewinnen.

Für die Niederschlagsanalysen wurden pro Wildbacheinzugsgebiet zuerst die möglichen und repräsentativen Niederschlagsmessstationen der verschiedenen Niederschlagsnetze ausgewählt (Schlupe und Wüthrich 2006). Berücksichtigt wurden dabei die folgenden Messnetze:

- ANETZ (Automatisches Messnetz der Schweiz), Niederschlagssumme 10 Minuten
- KLIMA (Konventionelles Klimanetz), Niederschlagssumme halbtäglich
- NIME (Niederschlagsmessnetz), Niederschlagssumme täglich

Die Niederschlags-Vorgeschichte aller Analysegebiete wurde anhand des Witterungskalenders und anhand der Niederschlagsmessdaten der Stationen in der Umgebung für den Zeitraum 1 Monat vor dem Ereignis analysiert und qualitativ klassiert (Jetel 2007).

Zur Abschätzung des Ereignisniederschlags wurden die Niederschlagssummen der umliegenden repräsentativen Messstationen während des Ereignisses analysiert. Die dabei erhaltenen Angaben zur Niederschlagssumme/Zeit, resp. Niederschlags-Intensität/Messintervall wurden anschliessend mit den Frequenzdiagrammen für 1- und 2- oder 5-Tageswerte, resp. Niederschlags-Intensitäts-Diagrammen aus Röthlisberger et al. (1976-1991) verglichen. Daraus konnte eine grobe Jährlichkeit der betreffenden Niederschlagsereignisse abgeschätzt werden (Jetel 2007). Die Abschätzungen dieser Jährlichkeiten zu jedem analysierten Grossereignis sind in den Factsheets im Anhang A ersichtlich.

Probleme ergaben sich bei diesem Vorgehen insbesondere bei lokalen Gewitterereignissen, die in den Daten der umliegenden Niederschlagsmessstationen aufgrund ihres konzentrierten, kleinräumigen Auftretens nicht sichtbar waren.

Die Ereignisse vom August 2005 bilden einen Spezialfall. Für sämtliche Auswertungen im Rahmen der Ereignisanalyse vom August 2005 wurden von der MeteoSchweiz digitale Datensätze zur Verfügung gestellt (MeteoSchweiz 2006 und Frei et al. 2008), welche ebenfalls mit einbezogen wurden. Es handelt sich dabei um:

- Tagesniederschlagssummen vom 1.8. bis 31.8.2005: Interpolierte Messdaten aus den ANETZ, NIME und IMIS Messnetzen im 2 km Raster, sog. Pluviometer-Datensatz
- Stündliche Radardaten vom 18.8. bis 23.8.2005 im 1 km Raster, sog. Radar-Datensatz
- Statistische Ermittlung der Jährlichkeit der 2-Tages-Niederschlagssummen 21./22.8.2005 ausgewählter Messstationen der Meteoschweiz

3.3.2 Abschätzungen der Hochwasserabflüsse

Abschätzungen zu den Abflussspitzen und Abflussfrachten während der untersuchten Grossereignisse waren nur in seltenen Fällen vorhanden und konnten im Nachhinein wegen fehlender Spuren kaum erhoben werden. Da in keinem der Analysegebiete Abflussmessungen durchgeführt werden und auch in den bestehenden Ereigniskatastern keine Angaben zu früheren Abflussmengen vorhanden waren, konnten diese Abschätzungen nicht eingeordnet und einer Jährlichkeit zugeordnet werden.

3.3.3 Geschiebebilanzen und Geschiebetransportprozesse

Qualitative und quantitative Angaben zu den während den Grossereignissen in den Analysegebieten abgelaufenen Geschiebeprozessen (Mobilisierung, Transport, Ablagerung) bilden die wichtigste Datengrundlage dieser Arbeit. Aus diesem Grund wurden sämtliche verfügbaren Quellen überprüft und verschiedene Methoden angewandt, um möglichst detaillierte Angaben zum vorherrschenden Transportprozess sowie zu den Geschiebebilanzen während den Grossereignissen zu gewinnen.

3.3.3.1 Datenerhebung

Die für diese Arbeit wichtigsten Erhebungen waren die quantitative Abschätzung der in Hang und Gerinne verlagerten Geschiebekubaturen und der daran beteiligten Transportprozesse, wobei der Mindest-Detaillierungsgrad auf Gerinneabschnitts-Ebene lag (vgl. Tab. 3-1).

Datenquellen

Bei allen Grossereignissen, die vor Projektbeginn im Januar 2004 abgelaufen sind, wurden die quantitativen und qualitativen Informationen zu den Geschiebeprozessen aus bestehenden Ereignisdokumentationen und –analysen von eidgenössischen oder kantonalen Fachstellen, Forschungsanstalten oder privaten Büros verwendet. Es handelte sich dabei meistens um Berichte mit Geschiebeabschätzungen, Berechnungen und Fotodokumentationen. Diese Unterlagen wurden bei Unklarheiten mit Befragungen der Gutachter ergänzt. Weiter wurde jedes Einzugsgebiet im Gelände begangen. Dadurch konnten noch sichtbare Spuren der abgelaufenen Ereignisse vor Ort interpretiert und die abgelaufenen Prozesse im Gelände nachvollzogen werden.

Bei allen Grossereignissen, die während der Projektzeit zwischen 2004 und 2009 abgelaufen sind, wurden im Gelände eigene unabhängige Ereignisanalysen mit Abschätzungen der Geschiebebilanzen erstellt. Diese wurden anschliessend, falls vorhanden, mit den offiziellen Abschätzungen der kantonalen Fachstellen und privaten Büros verglichen und ergänzt, so dass eine möglichst breit abgestützte Abschätzung nach bestem Wissen und Gewissen vorlag.

Vorgehen

Das Vorgehen bei den in diese Untersuchungen eingeflossenen Ereignisdokumentationen erfolgte sowohl bei den extern erstellten Dokumentationen der Grossereignisse vor 2004 als auch bei den eigenen Erhebungen nach 2004 anhand von detaillierten Geländeanalysen nach den Grundsätzen beschrieben in GHÖ (1999) oder PLANALP (2006). Diese wurden ergänzt mit Befragungen von lokalen Gebietskennern (Feuerwehr, Förster, Landwirte, etc.).

Erhobene Parameter

Zur Erstellung einer Geschiebebilanz wurden in sämtlichen geschieberelevanten Hang- und Gerinneabschnitten die Parameter gemäss Tab. 3-2 abgeschätzt:

Tab. 3-2: Erhobene Parameter für die Geschiebebilanzen

	Qualitative Parameter	Quantitative Parameter
Hang	Geschieberelevante Hangabschnitte: Lieferungsprozess während Ereignis, <ul style="list-style-type: none"> • Rutschung • Runse 	dabei gelieferte Kubatur: <ul style="list-style-type: none"> • Kubatur [m³] = Breite [m] * Länge [m] * Mächtigkeit [m] • Kubatur [m³] = Erosionsleistung [m³/m] * Länge der Runse [m]
Gerinne	Geschieberelevante Gerinneabschnitte: Transportprozess <ul style="list-style-type: none"> • Murgangtransport • Geschiebetrieb Funktion des Gerinneabschnitts, <ul style="list-style-type: none"> • Erosion • Transit • Ablagerung 	dabei mobilisierte/abgelagerte Kubatur: <ul style="list-style-type: none"> • Kubatur [m³] = Netto-Erosionsleistung [m³/m] * Länge [m] • Kubatur [m³] = Länge [m] * Breite [m] * Mächtigkeit [m]
Kegelhals		Geschiebefracht am Kegelhals: <ul style="list-style-type: none"> • Summe der mobilisierten und abgelagerten Kubatur [m³] aus Hang und Gerinne

Qualität der erhobenen Parameter

Die Qualität der Abschätzungen ist zum einen abhängig von der Qualität der Spuren im Gelände nach einem Grossereignis und zum anderen von den bestehenden Grundlagendaten vom Zustand vor dem jeweiligen Grossereignis:

Volumenbilanz Ereignis Rotlaibach Guttannen, 22.8.2005

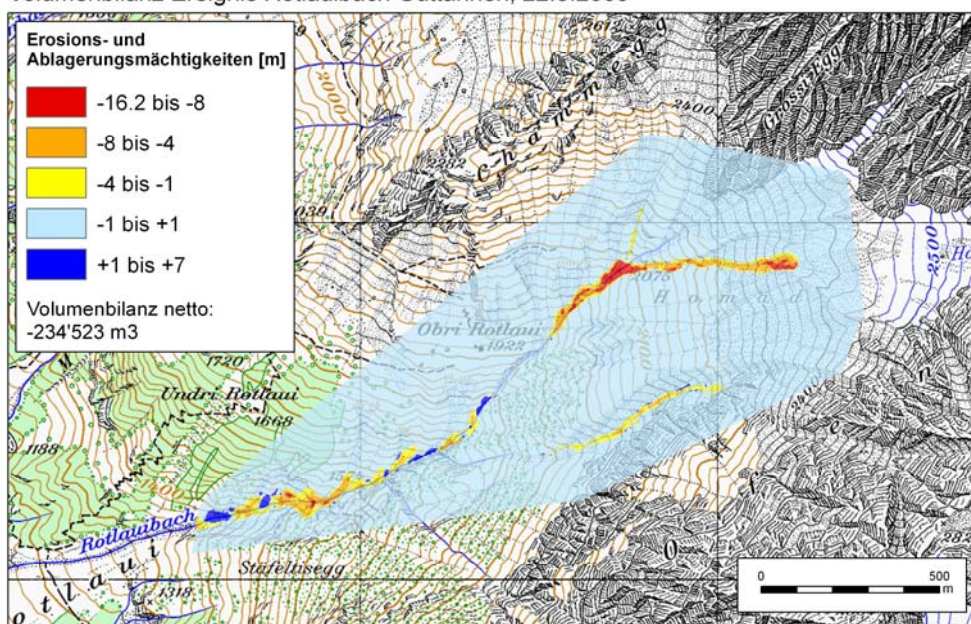


Abb. 3-2: Volumenbilanz berechnet durch einen Höhenmodellvergleich vor und nach dem Grossereignis im Rotlaibach (4), © 2008 swisstopo (JD082795), (Eigene Darstellung, Datenquelle: Flotron AG)

Sehr gute quantitative Abschätzungen können erreicht werden, wenn der Zustand vor und nach dem Ereignis auf einer quantitativen Basis bekannt ist. Dabei ergibt sich die Möglichkeit, einen Höhenmodell-Vergleich vor und nach einem Grossereignis mittels Laserscan-Daten oder Fotogrammetrie durchzuführen und dadurch das Volumen von erodierten, resp. abgelagerten Geschiebekubaturen zu berechnen (vgl. Abb. 3-2).

Gute quantitative Abschätzungen können erreicht werden, wenn der Zustand vor und nach dem Ereignis auf qualitativer Basis (z.B. auf Fotos/Luftbilder) bekannt ist (vgl. Abb. 3-3) oder sehr eindeutige Erosions- und Ablagerungsspuren im Gelände sichtbar sind (vgl. Abb. 3-4).



28.7.2003



5.8.2004

Abb. 3-3: Qualitativer Fotovergleich vor und nach dem Grossereignis im Rote Bach (6-8) vom 4.8.2004



Abb. 3-4: Deutliche Erosionsspuren im Gelände
links: Flachgründige Translationsrutschung im Rotlaubach (4-7) (Foto: Flotron AG)
rechts: Tiefen- und Seitenerosion im Gletscherbach des Vadret da l'Alp Ota (21-4)

Probleme bei der Abschätzung der erodierten Geschiebekubaturen ergeben sich insbesondere im Gerinnebereich, wenn der Zustand vor dem Ereignis unbekannt ist und keine eindeutigen Spuren zu diesem Zustand sichtbar sind. Hier können Befragungen von lokalen Gebietskennern weiterhelfen. Diese kennen ihre Umgebung bestens und können meist sehr präzise Angaben über den Zustand vor einem Ereignis machen.

Auch bei Umlagerungsstrecken, bei denen während der gesamten Ereignisdauer verschiedene Prozesse am gleichen Ort ablaufen (z.B. Erosion zu Beginn des Ereignisses, Ablagerung gegen Ende des Ereignisses) ist die Abschätzung der mobilisierten Geschiebekubatur nicht immer leicht. Da die Bilanzierung erst nach dem Ereignis erfolgt, können diese sich zeitlich abwechselnden Prozesse meist nicht mehr klar getrennt und rekonstruiert werden. Die Daten in dieser Arbeit beinhalten denn auch die so genannte Netto-Erosionsleistung. Die Netto-Erosionsleistung ist der erodierte Querschnitt am Ende eines Ereignisses. Wenn also während einem Ereignis zu Beginn eine Erosionsleistung von $3 \text{ m}^3/\text{m}$ erfolgt, danach wieder $1 \text{ m}^3/\text{m}$ abgelagert wurde, liegt die Netto-Erosionsleistung bei $2 \text{ m}^3/\text{m}$.

Die Abschätzung des Transportprozesses ist nicht immer einfach. Eindeutige Spuren im Gelände, wie beispielsweise, Levées, unsortierte Ablagerungen oder grosse gerundete Blöcke im Ablagerungsbereich sind dankbare Hinweise auf einen Murgangtransport (vgl. Abb. 3-5). Hilfreich sind auch Beschreibungen des Ereignisablaufs von der lokalen Bevölkerung.



Abb. 3-5: Deutliche Spuren von Murgangaktivität: Grosse, gerundete Blöcke oder Levées
links: Grosser, gerundeter Block auf dem Schwemmkegel des Fangtobels (32)
rechts: Levées auf dem Schwemmkegel des Alpenbachs (18)

Nützlich zur Plausibilisierung der im gesamten Einzugsgebiet erstellten Geschiebebilanz sind Geschiebesammler am Kegelhals, wo die Gesamt-Geschiebefracht anhand von Leerungskubaturen beziffert werden kann (vgl. Abb. 3-6). Auf diesem Prinzip basiert auch das einzige Geschiebemessnetz in der Schweiz, das GHO Geschiebemessnetz (Spreafico et al. 2005). Auf flachen, ausgedehnten Schwemmkegeln und wenn der grösste Anteil der Geschiebefracht aus dem Einzugsgebiet auf dem Schwemmkegel abgelagert und nicht bis in den Vorfluter transportiert worden ist, kann auch die Ablagerungskubatur auf dieser Fläche als Plausibilisierungswert der Abschätzungen im Einzugsgebiet beigezogen werden.



Abb. 3-6: Ablagerungskubaturen als Plausibilisierungswerte für abgeschätzte Geschiebefrachten
 links: Gefüllter Geschiebesammler im Eistlenbach (83)
 rechts: Ablagerungen auf dem Schwemmkegel des Schwendibachs (3)

Nicht empfehlenswert zur Rekonstruktion abgelaufener Ereignisse sind hingegen im Allgemeinen Informationen aus den Medien. „Die Medien bieten kein Abbild der Wirklichkeit, sondern konstruieren eine eigene Medienwirklichkeit. [...] Objektivität ist ein Ziel der Berichterstattung, das von den Medien propagiert und von den Konsumenten eingefordert wird. Aber Objektivität ist ein Ideal. Ihr soll nachgelebt werden im Bewusstsein, dass sie nicht erreichbar ist. Die Medien haben – vergleichbar mit der Juristerei – etliche Methoden entwickelt, die dazu dienen sollen, den Sachverhalt zu erhellen: Sie inspizieren den Ort des Geschehens, befragen Akteure und Zeugen, holen Expertenmeinungen ein, prüfen Zahlen, Fakten und Aussagen, benutzen verschiedene Quellen und beurteilen deren Verlässlichkeit und Interessenlage, und sie transportieren verschiedene Ansichten, um im Kontrast die Verhältnisse zu klären. Gleichwohl ist die Wirklichkeit in den Medien ein Konstrukt, das durch Selektion, Gewichtung, Bewertung, Fokussierung, Auslassung und spezifische Darstellungsarten strukturiert ist. [...] Die Perspektive der Behörden oder jene der Experten ist bestenfalls eine Perspektive neben andern.“(Stalder 2006)

Begriffe zur Prozessbeschreibung werden in den Medien oft vermischt angewendet. Informationen zu den abgelaufenen Prozessen und den dabei gelieferten Geschiebekubaturen als Grundlage für Ereignisanalysen sind somit meist mit Vorsicht zu genießen. Allerdings ist es auch nicht Aufgabe der Medien, solche Informationen zu liefern.

Einordnung der Geschiebedaten anhand historischer Ereignisse

Wo Informationen zu früheren Ereignissen in den Analyseböden aus Ereigniskatastern oder aus der StorMe-Datenbank des Bundesamts für Umwelt vorhanden waren, wurden diese zusammengetragen und auf vereinfachten Magnituden-Frequenzdiagrammen dargestellt (Kienholz 2007). Die analysierten Grossereignisse wurden anschliessend mit diesen früheren dokumentierten Ereignissen verglichen. Das Ziel dabei war, abzuschätzen, ob die analysierten Grossereignisse Ähnlichkeiten mit bereits früher abgelaufenen Ereignissen hatten. Weiter sollten sie grob einer Wiederkehrdauer grösser oder kleiner 100 jährlich zugeordnet werden. Dies gestaltete sich aus mehreren Gründen schwierig:

Der Begriff der Wiederkehrdauer wird synonym zum Begriff Eintretenswahrscheinlichkeit verwendet. Er ist ein künstlicher, rein statistischer Wert, der insbesondere in der Hydrologie verwendet wird. Einem abgelaufenen Ereignis eine Jährlichkeit zuzuordnen gestaltet sich schwierig, insbesondere wenn es sich um seltene Ereignisse handelt, wie es Grossereignisse per Definition in dieser Arbeit sind (vgl. Kap. 2.1.3). Folgende Gründe sind laut Bezzola und Hegg (2007) bezogen auf die Einordnung von Hochwasserereignissen durch Extremwertstatistik dafür verantwortlich:

- Extremereignisse bilden insbesondere in kürzeren Messreihen grosse statistische Ausreisser und es besteht deshalb eine Tendenz zur Unterschätzung der Jährlichkeit seltener Ereignisse in kurzen Reihen.
- Die berechneten Wiederkehrperioden von seltenen Ereignissen sind keine robusten Werte, sondern reagieren sehr sensibel auf Veränderungen der betrachteten Mess-/Beobachtungsperiode, allfällige Trends oder Sprünge in den Messdaten.

Eine weitere grundsätzliche Schwierigkeit spricht Petrascheck (2008) an. Wenn sehr seltene Ereignisse mittels Extremwertstatistik abgeschätzt werden, sind die Aussagen sehr unsicher. Bei Aussagen zu Bemessungseignissen aufgrund von Wiederkehrperioden werden die Vertrauensintervalle und die dabei herrschenden grossen Unsicherheiten jedoch nur selten angegeben, was eine Genauigkeit vortäuscht, die nicht vorhanden ist. Dieser Sachverhalt wird in Abb. 3-7 anschaulich gezeigt (BWG 2001). Das Beispiel der Rhone bei Sion zeigt, wie gross die Unsicherheiten bei der Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten sein können. Dem Abfluss von $1050 \text{ m}^3/\text{s}$ kann zwar eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren zugewiesen werden. Das Vertrauensintervall von 80% bedeutet aber auch, dass der entsprechende Abfluss sowohl einem 40-jährlichen als auch einem 800-jährlichen Ereignis zugeordnet werden kann.

Wie in Abb. 3-7 ersichtlich ist, sind bereits bei der Einordnung von extremen Abflüssen, bei denen als statistische Grundlage längere Messreihen bestehen, den Aussagen zu Jährlichkeiten methodisch Grenzen gesetzt. Umso schwieriger gestalten sich diese Aussagen bei Geschiebefrachten in Wildbachsystemen, wo keine Messreihen vorhanden sind und als einzige Anhaltspunkte in die Vergangenheit mehr oder weniger gut recherchierte und nachgeführte Ereigniskataster berücksichtigt werden können.

Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit bewusst der Begriff „Grossereignisse“ und die relativ „schwammige“ Definition einer Jährlichkeit $\text{ca.} \geq 100$ gewählt. Dieser Begriff und seine Definition sollen die Unsicherheiten und Unschärfen, die im Umgang mit Wiederkehrdauern und Jährlichkeiten bestehen, offen darlegen. Die Abschätzungen der Jährlichkeiten der Geschiebefrachten bei den einzelnen analysierten Grossereignissen im Anhang A wurden mit bestem Wissen und Gewissen durchgeführt und möglichst breit abgestützt. Trotzdem wird empfohlen, diese Werte

kritisch und mit dem Bewusstsein, dass es sich um sehr unsichere Angaben handelt, zu betrachten.

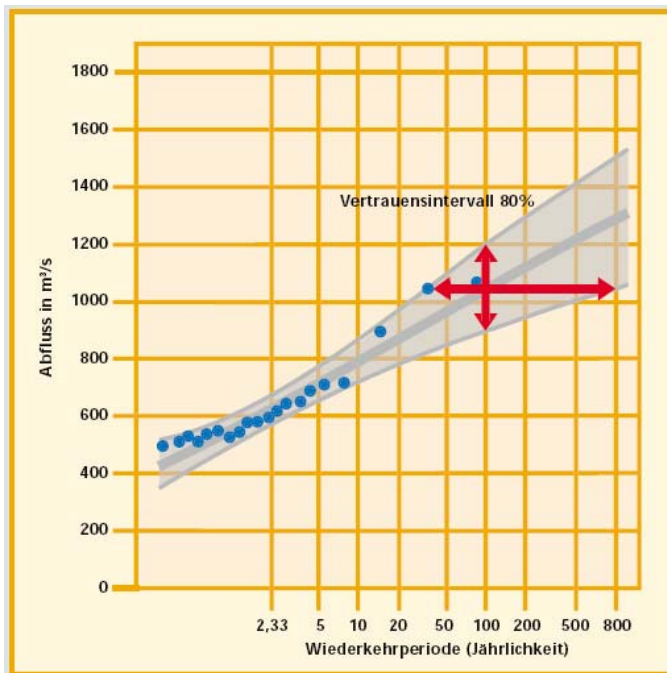


Abb. 3-7: Extremwertstatistik am Beispiel der Rhone in Sion (BWG 2001)

3.3.3.2 Datenaufbereitung

Die gemäss Tab. 3-2 aufgenommenen Daten aus den Geländeanalysen und Ereignisdokumentationen wurden im GIS als Ausgangslage für die Datenanalysen als verschiedene Rasterdatensätze abgespeichert. Dabei wurden die folgenden Datenlayer bereitgestellt (vgl. Tab. 3-3):

Tab. 3-3: Rasterdatensätze mit Informationen zu den Grossereignissen

Information zu	Layer	Daten im File
Hangprozesse	grel_h	Rasterdatensatz mit der geschieberelevanten Fläche im Hang und Ablagerungsflächen ausserhalb des Gerinnes
	hproz	Rasterdatensatz mit der geschieberelevanten Fläche im Hang und dem daran beteiligten Lieferungsprozess. Unterschieden werden Lieferung durch Rutschungen und Runsen
	hkub	Rasterdatensatz mit der geschieberelevanten Fläche im Hang und der pro Pixel gelieferten Geschiebekubatur
Gerinneprozesse	grel_g	Rasterdatensatz der geschieberelevanten Gerinnepixel
	func	Rasterdatensatz der geschieberelevanten Gerinnepixel mit Angaben zur Funktion jedes Pixels während dem Ereignis. Unterschieden werden die Funktionen (Erosion, Transit oder Ablagerung).
	el_netto	Rasterdatensatz der geschieberelevanten Gerinnepixel mit Angaben zur Netto-Erosionsleistung (Positiv im Fall von Erosion, Negativ im Fall von Ablagerung, Null bei Transit oder absolut ausgeglichenen Umlagerungsstrecken).
	gkub	Rasterdatensatz der geschieberelevanten Gerinnepixel mit der pro Gerinnepixel mobilisierten Kubatur. Errechnet sich durch die Länge des Pixels (je nach Fliessrichtung horizontal, vertikal oder diagonal) multipliziert mit der el_netto.
	tp	Rasterdatensatz der geschieberelevanten Gerinnepixel mit Angaben zum vorherrschenden Transportprozess. Unterschieden werden Murgangtransport und Geschiebetrieb.
Geschiebefracht	gfacc	Rasterdatensatz mit der aufsummierten Geschiebebilanz (hkub + el_netto) entlang des Fliessweges bis hinunter zum Kegelhals. In jedem Pixel ist die Geschiebefracht, welche von seinen oberhalb liegenden Gerinnepixeln her kommt, ersichtlich. Der Wert beim untersten Pixel bildet die Geschiebefracht am Kegelhals

3.4 Digitale Daten zum Naturraum in den Analysegebieten

Um die naturräumlichen Bedingungen in den Analysegebieten zu beschreiben, wurden verschiedene benötigte digitale Grundlagendaten zusammengetragen und erstellt:

3.4.1 Bestehende Datengrundlagen und ergänzende Datenerhebungen

3.4.1.1 Digitales Höhenmodell

Als digitale Grundlagendaten zur Beschreibung der Topographie standen das DHM25 der swisstopo (Bundesamt für Landestopographie 2005a) als Rasterdatensatz (25m Raster) und als Basishöhenmodell (Linien der Höhenkurven) zur Verfügung. Es zeigte sich, dass der Rasterdatensatz die kleinräumigen Verhältnisse in Wildbacheinzugsgebieten nicht überall gut zu beschreiben vermochte. So stellten sich die Probleme, dass die Fliesswege (flowdirection) entlang des Höhenmodells aufgrund von Generalisierungen nicht überall stimmten oder Teileinzugsgebiete im Höhenmodell in Nachbar-Einzugsgebiete flossen.

Aufgrund dieser Erfahrungen wurde mit dem Basishöhenmodell gearbeitet. Um gute Resultate zu erzielen, musste dieses aber ergänzt und verbessert werden: Zusätzlich zu den Höhenlinien wurden die Gerinneachsen digitalisiert und als 3D-Shapefiles abgespeichert. Bei der anschließenden Berechnung zu einem TIN (Triangular Irregular Network) wurden die Höhenlinien des Basishöhenmodells als „soft breaklines“, die digitalisierten Gerinneläufe als „hard breaklines“ behandelt, wodurch das TIN im gerinnenahen Bereich gezwungen wurde, die Geländetopographie ohne Generalisierungen auf die Gerinnesohle zu legen. Dadurch konnte das Höhenmodell im Gerinnebereich verbessert werden. Aus dem TIN wurde anschliessend ein Raster mit 5m Auflösung berechnet, welches für die weiteren Berechnungen benutzt wurde.

Denkbar gewesen wäre auch die Verwendung von Laserscan-Daten der swisstopo (DTM-AV) zur Erstellung eines Höhenmodells. Diese waren zu Projektbeginn im Jahre 2004 jedoch noch nicht für den gesamten Alpenraum verfügbar. Zudem sind grundsätzlich keine Laserscan-Daten in Gebieten oberhalb 2000 m ü. M. vorhanden. Auch die heute bestehenden Rasterdatensätze aus Laserscan-Daten im 2m Raster, verschmolzen mit Informationen aus dem DHM25 in Gebieten oberhalb 2000 m ü. M., waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorhanden.

3.4.1.2 Digitales Gewässernetz

Als Datensatz zum Gewässernetz stand das Gewässernetz des VECTOR25 Datensatzes der swisstopo (Bundesamt für Landestopographie 2005b) zur Verfügung. Das digitale Gewässernetz basiert inhaltlich und geometrisch auf der Landeskarte 1 : 25'000 und ist als Vektordatensatz verfügbar. Nach anfänglichem Einbezug wurde dieser Datensatz aber schliesslich aus 2 Gründen nicht für die Untersuchungen verwendet. Erstens sind viele Wildbachgerinne und Runsen auf der Landeskarte 1:25'000 nicht als Gewässer (blauer Strich) kartiert, da es sich nicht um perennierende Gewässer handelt. Sie sind somit im digitalen Gewässernetz gar nicht enthalten. Zweitens sind die Gerinneläufe dieses Datensatzes nicht deckungsgleich mit den „virtuellen“ Gerinneläufen, welche aus den digitalen Höhenmodellen berechnet werden. Der Grund liegt darin, dass das digitale Gewässernetz ein kartographisches Produkt mit Generalisierungen ist, während das digitale Höhenmodell ein Produkt aus der Landesvermessung und somit lagerichtig ist. Rasterbasierte hydrologische Berechnungen im GIS werden auf der Grundlage des

digitalen Höhenmodells durchgeführt und somit sind diese „virtuellen“ Gerinneläufe massgebend.

3.4.1.3 Digitale geologische Informationen

Digitale Grundlagendaten zur Geologie (Lithologie, Tektonik, Strukturgeologie) für Fragestellungen in kleinräumigen Gebieten, wie es Wildbachsysteme darstellen, sind in der Schweiz rar.

Es existiert der digitale Datensatz der „Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz“ aus den Jahren 1963-67 aus Daten der GEOSTAT (Bundesamt für Statistik 1995) als Polygondatensatz im Massstab 1:200'000. Dieser Datensatz weist verschiedene Probleme auf: Grundsätzlich ist der Massstab problematisch und zu stark generalisiert für die Betrachtung von kleinräumigen Phänomenen. Hinzu kommt, dass die Kartenoriginale (Schweizerische, Geotechnische Kommission 1967) einer nicht mehr rekonstruierbaren Verzerrung unterliegen und für die Digitalisierung und Einpassung ins Schweizer Koordinatensystem verschiedener Entzerrungsverfahren unterzogen werden mussten. Trotz diesen Entzerrungen entspricht die Genauigkeit im Massstab 1 : 200'000 einer maximalen Abweichung von 1 mm, also einer ungefähren Genauigkeit von 200 m. Für Betrachtungen von Hängen, die maximal 100 m von den Gerinneachsen entfernt liegen, ist diese Genauigkeit zu gering.

Eine Alternative bilden die Kartenblätter des Geologischen Atlas der Schweiz des Bundesamts für Landestopographie, welche detaillierte Informationen zur Lithologie und Strukturgeologie in einem guten Massstab von 1 : 25'000 liefern. Diese Karten existieren jedoch nur für ca. 1/3 der Fläche der Schweiz und sind digital nur als Pixelkarten vorhanden. Dies bedeutet, dass die Information auf der Karte nur als Bild, aber nicht als eigentliche Geoinformation vorhanden ist.

Für die Beschreibung der Geologie der Analysegebiete wurden, wo vorhanden, die Informationen zur Lithologie aus den digitalen Pixelkarten des Geologischen Atlas der Schweiz (Bundesamt für Wasser und Geologie, Bundesamt für Landestopographie 2005) von Hand digitalisiert und diese Vektordaten anschliessend gerastert. In Gebieten, wo keine Atlasblätter vorhanden waren, musste auf teilweise bis 100 Jahre alte Geologische Spezialkarten in kleineren Massstäben zurückgegriffen werden. Diese wurden eingescannt und anschliessend digitalisiert.

3.4.1.4 Digitale Informationen zur Bodenbedeckung

Zur Beschreibung der Bodenbedeckung stehen zwei digitale Datensätze zur Verfügung.

Der Rasterdatensatz der Arealstatistik aus Daten der GEOSTAT (Bundesamt für Statistik, 1992/97) hat eine Auflösung von 25 m und wird alle 12 Jahre aus der Grundlage von Luftbildern des Bundesamtes für Landestopographie erhoben. Die Arealstatistik beinhaltet 72 verschiedene Klassen der Bodennutzung und Bodenbedeckung. Eine dieser Klassen bei den unproduktiven Flächen ist die Klasse „Fels, Sand, Geröll“. Da in dieser Klasse ein für Geschiebefragestellungen grundlegendes Unterscheidungsmerkmal, nämlich die Unterscheidung zwischen Fels und Lockermaterial, in einer Klasse zusammengefasst ist, ist dieser Datensatz ungeeignet.

Als Alternative bestehen die Primärflächen des VECTOR25 Datensatzes der swisstopo (Bundesamt für Landestopographie 2005c). Die Primärflächen basieren inhaltlich und geometrisch auf der Landeskarte 1 : 25'000 und sind als Vektordatensatz verfügbar. Unterschieden werden 28 verschiedene Klassen, welche die Bodenoberfläche beschreiben. Die unproduktiven Flächen sind in diesem Datensatz viel stärker unterteilt als bei der Arealstatistik, insbesondere wird eine

Unterscheidung zwischen anstehendem Fels und lockerem Geröll gemacht. Dies macht diesen Datensatz für Fragestellungen zum Geschiebehaushalt von Wildbachsystemen sehr nützlich.

Zur Ergänzung des Primärdatensatzes konnte zudem der Datensatz SwissImage der swisstopo (Bundesamt für Landestopographie 2005d) mit aktuellen Orthofotos herangezogen werden. So sind auf Luftbildern zusätzliche Informationen wie beispielsweise die Aktivität von einzelnen Steilrinnen oder Gerinnen sichtbar.

3.4.1.5 Informationen zum Lockermaterialangebot

Da zum Lockermaterialangebot keine flächendeckenden digitalen Daten bestehen, wurde ein eigener Datensatz erstellt. Durch einen Verschnitt des Primärdatensatzes (VECTOR25) mit dem Geologie-Datensatz wurde allen Felsflächen im Primärdatensatz die entsprechende Lithologie des Geologie-Datensatzes zugewiesen. Bei Flächen mit Bodenbedeckungen, bei denen es ein Lockermaterialangebot braucht (Wald, Übriges, Gebüsch, etc.) wurde Lockermaterial ausgeschieden. Wenn in der geologischen Karte an diesen Stellen „anstehender Fels“ vorlag, wurde das Lockermaterialangebot als „limitiert“ angenommen, wenn in der geologischen Karte Lockermaterial (z.B. Moräne, Gehängeschutt etc.) kartiert war, wurde es als „unlimitiertes Lockermaterial“ betrachtet.

Bei den Feldaufnahmen in den Analysegebieten zeigte sich, dass diese vereinfachte Methode den realen Bedingungen nicht gerecht wird. Die Grundlage des Primärdatensatzes ist die Landeskarte 1 : 25'000. Der Generalisierungsgrad bei den Felsflächen ist gross, d.h. dass in vielen Gerinneabschnitten die Sohle aus anstehendem Fels bestand, während sie im Primärdatensatz und somit im daraus generierten Datenlayer „Lockermaterialangebot“ als limitiertes oder unlimitiertes Lockermaterial klassiert war. Aus diesem Grund wurde das Lockermaterialangebot in den Analyseebenen im Gerinne aufgrund der Feldaufnahmen neu klassiert.

3.4.2 Datenaufbereitung

Mit der Grundlage dieser Datensätze konnten für die 58 Analysegebiete verschiedene Datenlayer übernommen resp. erstellt werden. Tab. 3-4 gibt einen Überblick über die pro Analysegebiet erstellten rasterbasierten Datenlayer:

Tab. 3-4: Datenlayer im GIS zu den Naturräumlichen Bedingungen

Information zu	Layer	Daten im File
Topographie/Morphometrie	dhm	Rasterdatensatz mit Meereshöhe pro Pixel
	eg	Aufgrund des dhm abgegrenztes hydrologisches Einzugsgebiet vom Kegelhals aufwärts
	flowd	Rasterdatensatz mit Fliessrichtungen (flowdirection) jedes Pixels im eg
	flowa	Rasterdatensatz mit Anzahl Zellen, die in entsprechendem Pixel entwässern (flowaccumulation) im eg. Bei Multiplikation mit der Pixelfläche ergibt dieser Datensatz die Einzugsgebietsfläche oberhalb jedes Pixels
	slope	Rasterdatensatz mit der Hangneigung in ° und in % jedes einzelnen Pixels im eg
Geologie	geol	Rasterdatensatz mit lithologischen Informationen zu den verschiedenen Gesteinen und Lockermaterialarten im eg
Bodenbedeckung	pr25	Rasterdatensatz mit Bodenbedeckung aus dem Primärflächendatensatz im eg
Lockermaterialangebot	lm	Rasterdatensatz mit dem Lockermaterialangebot im eg, unterteilt in die drei Klassen: Fels, Lockermaterial limitiert und Lockermaterial unlimitiert. Dieser Datensatz wurde durch einen Verschnitt von pr25 und geol erstellt und durch Feldaufnahmen im Gerinnebereich angepasst

3.5 Analysen zum Einfluss des Naturraums auf die Grossereignisse

Das Ziel der Analysen war es, sowohl qualitative als auch quantitative Zusammenhänge zwischen den naturräumlichen Bedingungen und den bei den Grossereignissen beobachteten Geschiebeprozessen herzustellen. Für diese Zusammenhänge sollten anschliessend allgemeingültige Faustformeln, Schwellenwerte und Erfahrungswerte gebildet werden. Dadurch sollte einerseits das Prozessverständnis ganz allgemein verbessert werden, andererseits dienten sie als Grundlage für die Entwicklung des Geschiebeabschätzverfahrens (vgl. Kap. 3.6).

Für die Analyse der Hangprozesse wurden insgesamt 121 Auslösepunkte von Rutschungsprozessen in den 58 Analysebächen bestimmt und statistische Auswertungen hinsichtlich der dort herrschenden naturräumlichen Bedingungen durchgeführt. Es folgten Analysen zu den gelieferten Volumina dieser Rutschungen und der anschliessenden Mobilisierung im Gerinne. Zusätzlich wurde die Geschiebelieferung durch Runsen analysiert.

Für die Analyse der Gerinneprozesse wurden in einem ersten Schritt homogene Gerinneabschnitte abgegrenzt. Die Kriterien für die Abgrenzung dieser Gerinneabschnitte wurden sowohl anhand von naturräumlichen als auch anhand von der während den Grossereignissen abgelaufenen Prozesse festgelegt. Bei den naturräumlichen Faktoren standen das Lockermaterialangebot (Klassen Fels, Lockermaterial limitiert und Lockermaterial unlimitiert) und das Gerinnenetz (Abgrenzungen bei seitlichen Einmündungen) als grenzgebende Faktoren im Vordergrund. Von den analysierten Grossereignissen her waren die Funktion des Gerinneabschnitts (Erosion, Transit oder Ablagerung) sowie der Transportprozess (Geschiebetrieb oder Murgang) und die Grössenordnung der beobachteten Erosionsleistungen als Grenzen massgebend. Insgesamt wurden in den 58 Analysegebieten 352 Gerinneabschnitte abgegrenzt.

Zu jedem dieser Gerinneabschnitte wurden anschliessend in einem zweiten Schritt sämtliche wichtigen Kennzahlen in einer Datenbank zusammengefasst. Die Daten dazu stammen aus den digitalen Rasterdatensätzen zu den naturräumlichen Faktoren und zu den Grossereignissen, dargestellt in Kap. 3.3 Tab. 3-3 und Kap. 3.4 Tab. 3-4. Um diese in die Datenbank zu integrieren, mussten aus den vorhandenen Pixelwerten im 5 m Raster Mittelwerte für die gesamten Gerinneabschnitte berechnet werden. Diese Datenbank bildete die Grundlage für die weiteren Auswertungen.

Jeder Gerinneabschnitt ist ein Individuum mit einer einzigartigen Kombination aus zahlreichen verschiedenen Einflussfaktoren wie beispielsweise der Gerinneneigung, der Einzugsgebietsfläche, dem Lockermaterialangebot und der Beeinflussung durch oberhalb liegende Gerinneabschnitte etc. Auch bei den abgelaufenen Grossereignissen wurde jeder Gerinneabschnitt durch verschiedene Abläufe beeinflusst. Jeder Gerinneabschnitt hatte z.B. einen anderen Abfluss oder ein anderes Prozessgeschehen zu verzeichnen. Unter diesen Voraussetzungen, dass die Stichprobe praktisch nicht grösser war als die unbekanntes Variablen, war es nicht möglich, umfassende statistische Auswertungen oder gar eine Regression durchzuführen.

Vielmehr ging es zuerst darum, durch qualitative Analysen jedes einzelnen Grossereignisses mögliche Einflussfaktoren auf die Geschiebeprozesse im Gerinne zu suchen und zu definieren. Danach musste für jeden dieser definierten Einflussfaktoren ein geeignetes Mass für dessen Beschreibung gefunden werden (vgl. Kap. 6). Im optimalen Fall war dieses Mass quantitativer Art, wenn nicht möglich, dann wurden Klassierungen oder qualitative Beschreibungen als Mass definiert. Erst dann konnten die wirklichen Auswertungen begonnen werden, indem versucht wurde, die abgelaufenen Geschiebeprozesse mit den Einflussfaktoren in Zusammenhang zu bringen. Zuerst wurde der Einfluss jedes einzelnen Faktors auf die entsprechenden Geschiebe-

prozesse betrachtet. Danach wurden Muster und ähnliche Verhalten durch verschiedene Einflussfaktor-Kombinationen gesucht und dadurch allgemein gültige Schwellenwerte, Grenzwerte und Bedingungen formuliert, bei welchen bestimmte Prozesse ablaufen können oder unterbunden werden.

Obwohl mit 58 Analysebächen und 352 Gerinneabschnitten die Anzahl untersuchter Grossereignisse und Gerinneabschnitte relativ gross war, ergab sich bei den Datenanalysen immer wieder eine ähnliche Einschränkung: Spezifische Einflussfaktor-Kombinationen waren trotz der an sich grossen Stichprobe jeweils nur bei einer kleinen Anzahl Gerinneabschnitten vorhanden. Dadurch konnten erstens oft nur Einzelfälle analysiert werden und zweitens nicht immer Verallgemeinerungen herausgezogen werden. Wenn doch, konnten diese Verallgemeinerungen aufgrund der kleinen Stichproben nicht auf Signifikanz getestet werden.

3.6 Entwicklung und Validierung des Geschiebeabschätzverfahrens

3.6.1 Entwicklung

Aufgrund der Schwellenwerte, Muster, Tendenzen und Bedingungen, welche in den Datenanalysen (vgl. Kap. 3.5) definiert werden konnten und aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse zum Prozessverständnis, wurde ein Geschiebeabschätzverfahren entwickelt. Die Schwierigkeit bestand darin, die aufgrund der unterschiedlichsten Einflussfaktor-Kombinationen komplexen Abläufe, welche bei einem Grossereignis Normalfall sind, für das Abschätzverfahren wieder zu vereinfachen und auf das Wesentliche zu beschränken. Nur so konnte aber die Zielsetzung der Entwicklung eines pragmatischen und praxistauglichen Abschätzverfahrens erreicht werden.

In einem ersten Schritt wurden die Ziele, Anforderungen und Rahmenbedingungen abgesteckt. In einem zweiten Schritt wurde je eine Beurteilungsmatrix pro Hang- und Gerinneabschnitt entwickelt. Diese wurden in einem dritten Schritt an allen Analysebächen getestet und iterativ angepasst und optimiert. Dabei ging es einerseits darum zu garantieren, dass die in den Analysebächen abgelaufenen Grossereignisse rein qualitativ in ihren Prozessmechanismen und – abläufen mittels des Abschätzverfahrens nachgebildet werden konnten. Andererseits sollten diese nachgebildeten Prozessabläufe mit möglichst guten, resp. der Realität entsprechenden, quantitativen Geschiebeabschätzungen simuliert werden können.

Insgesamt wurde das Abschätzverfahren in fünf iterativen Umgängen an den 58 Analysegebieten getestet und nach jedem Umgang wieder angepasst, verbessert und optimiert.

Zum Schluss wurde das Abschätzverfahren in Excel so aufbereitet und automatisiert, dass für den/die Anwender/in eine geführte Durchführung der Abschätzung besteht, die es erlaubt, unter möglichst minimalem Zeitaufwand eine effiziente Beurteilung durchzuführen.

Das entwickelte Geschiebeabschätzverfahren wird in Kap. 10 detailliert vorgestellt.

3.6.2 Validierung und Sensitivitätsanalyse

Das entwickelte Geschiebeabschätzverfahren wurde 2-stufig validiert (vgl. Kap. 11):

In **Stufe 1** wurden 20 zusätzliche Grossereignisse in Ereignis-Validierungsgebieten ausgewählt (vgl. Kap. 3.2 und Kap. 4.1) und die bei diesen Grossereignissen abgelaufenen Geschiebeprozesse mit dem Geschiebeabschätzverfahren simuliert. Dann wurde ein Vergleich zwischen den Geschiebefrachten der tatsächlich abgelaufenen Grossereignisse und den simulierten Werten gemacht. Dadurch konnten Schwachstellen der Szenarienbildung und der quantitativen Geschiebeabschätzung sowie sensible Inputfaktoren im Abschätzverfahren identifiziert werden.

Da mit dem Abschätzverfahren Geschiebeabschätzungen eines 100 bis 300 jährlichen Ereignisses für jeden alpinen Wildbach berechnet werden sollen, wurden in **Stufe 2** 23 Wildbachsysteme (sog. Abschätzungs-Validierungsgebiete) ausgewählt, für die eine Geschiebeabschätzung im Rahmen der Erstellung von Gefahrenkarten oder Integralprojekten vorhanden war (Auswahlkriterien siehe Kap. 3.2, betreffende Wildbäche siehe Kap. 4.1).

Unvoreingenommen, ohne diese Grundlagen vorgängig zu konsultieren, wurden zuerst mit dem entwickelten Geschiebeabschätzverfahren unabhängige Abschätzungen verschiedener Szenarien durchgerechnet. Dabei wurden im Normalfall 3 verschiedene Szenarien betrachtet:

- SzO („Optimistisches Szenario“): Hier wurde in den meisten Fällen ein sehr optimistisches Szenario angenommen (z.B. reiner Geschiebetrieb, kaum Hangprozesse). Dieses Szenario steht für die „untere Grenze“ der Bandbreite eines möglichen Grossereignisses.
- SzX: („Szenario X“): Hier wurden dem individuellen Charakter jedes Einzugsgebiets angepasste und denkbare realistische Szenarien durchgerechnet, falls möglich mit Murgangtransport und Hanginput, je nach Bedingungen im Einzugsgebiet.
- SzP: („Pessimistisches Szenario“): Hier wurde jeweils das pessimistischste, aber dennoch realistische Szenario durchgerechnet, um so die „obere Grenze“ einer möglichen Bandbreite der Geschiebefracht am Kegelhals einzugrenzen.

Nachdem diese Berechnungen abgeschlossen waren, wurden in einem zweiten Schritt die Grundlagen zu den „offiziellen“ Abschätzungen anlässlich der Gefahrenkartenerstellung oder Integralprojekte bei den kantonalen Fachstellen bezogen und die den „offiziellen“ Abschätzungen zugrunde liegenden Szenarien studiert. Diese Szenarien wurden mit den unter Schritt 1 eigens entwickelten Szenarien verglichen. Wenn die zugrunde liegenden qualitativen Szenarien der offiziellen Abschätzungen auch in der eigenen Abschätzung so angenommen und berechnet worden waren, wurden die dabei erhaltenen quantitativen Geschiebefrachten direkt mit denjenigen aus den offiziellen Abschätzungen verglichen. Wenn für die offiziellen Abschätzungen andere Szenarien die Grundlage bildeten als bei den eigenen Abschätzungen angenommen, wurden diese zuerst mit dem Abschätzverfahren nachsimuliert und dann verglichen.

Dieses Vorgehen erlaubte eine unabhängige Validierung des Abschätzverfahrens und durch die Anwendung der verschiedenen optimistischen und pessimistischen Szenarien auch eine Sensitivitätsanalyse der verschiedenen Szenarien und der Inputfaktoren für das Abschätzverfahren.

Ebenfalls in dieser Validierungsstufe wurde eine Geschiebeabschätzung für den Steinibach in der Gemeinde Flühli (LU) erstellt, um den Vergleich, den Zimmermann und Lehmann (1999) durch mehrere verschiedene Abschätzverfahren erstellt haben (vgl. Kap. 2.5.6.1), mit der in dieser Arbeit entwickelten Methodik zu ergänzen.

4 Untersuchungsgebiete

Kap. 4 soll einerseits einen geographischen Überblick über die Untersuchungsgebiete geben (vgl. Kap. 4.1), andererseits sollen die naturräumlichen Bedingungen in den verschiedenen Untersuchungsgebieten zusammenfassend charakterisiert werden (vgl. Kap. 4.2). In Kap. 4.3 sind zudem Informationen zu den analysierten und validierten Grossereignissen zu finden.

4.1 Stichprobe

Die Kriterien, die zur Auswahl der Stichprobe geführt haben, richten sich nach den methodischen Zielen und wurden in Kap. 3.2 dargestellt.

Abb. 4-1 zeigt die geographische Lage und die Nummerierung der Untersuchungsgebiete. In Tab. 4-1, Tab. 4-2 und Tab. 4-3 sind neben den Bachnamen, Gemeinden und Koordinaten des Kegelhalses pro Untersuchungsgebiet die wichtigsten Kennzahlen zu den naturräumlichen Faktoren (Einzugsgebietsfläche, höchster und tiefster Punkt, mittlere Gebietshöhe, mittlere Hangneigung und Hauptgeologie) ersichtlich. Bei den Analysegebieten und Ereignis-Validierungsgebieten folgen zusätzliche Informationen zu den wichtigsten Ereignismerkmalen (hydrologischer Auslöser, Transportprozess, hauptsächliche Geschiebequelle und Geschiebefracht am Kegelhals).

Ergänzend zu dieser tabellarischen Zusammenfassung ist im Anhang A zu jedem Einzugsgebiet ein Factsheet mit einer Karte abgelegt, ergänzt mit zusätzlichen Informationen zu den Datengrundlagen der Datenanalysen, und den Validierungen. Die Nummern der Factsheets entsprechen der Nummerierung in Abb. 4-1.

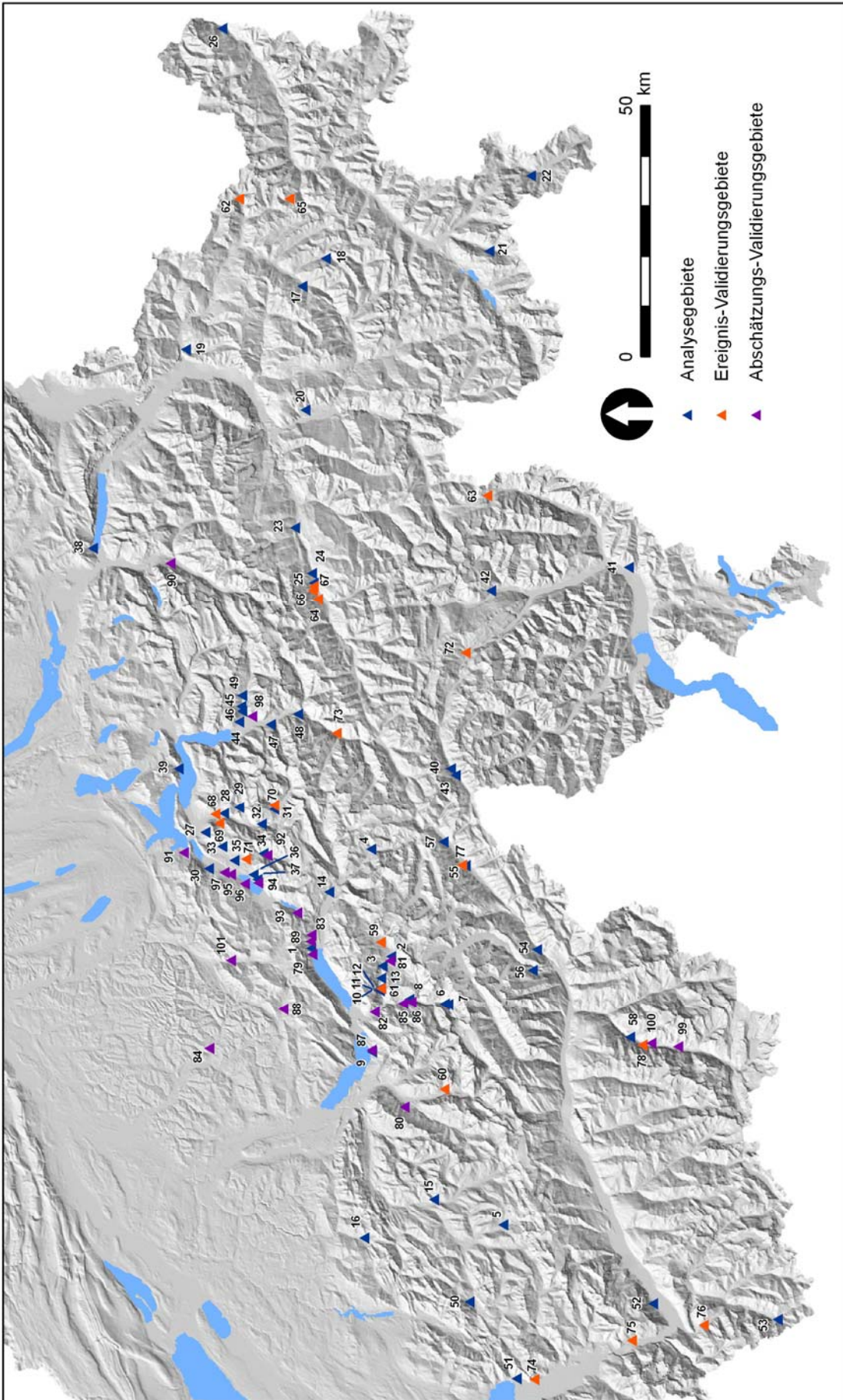


Abb. 4-1: Lage und Nummerierung der Analysegebiete (blau), Ereignis-Validierungsgebiete (orange) und Abschätzungs-Validierungsgebiete (violett)

Tab. 4-1: Kennzahlen zu den Analysegebieten

Nr.	Wildbach	Gemeinde/Ort	Kanton	X Koordinate Kegehnals	Y Koordinate Kegehnals	Einzugsgebietsfläche [km ²]	Höchster Punkt [m ü. M.]	Tiefster Punkt [m ü. M.]	Mittlere Höhe [m ü. M.]	Mittlere Hangneigung [°]	Hauptgeologie Kr = Kristallin, Ka = Kalk; F = Flysch; M = Molasse	Datum Grosseereignis	Hydrolog. Auslöser L = Längsgeh. Niederschläge G = Gewitter NU = Niederschlagsunabhängig	Transportprozess MG = Murgang; GT = Geschlebetrieb	Haupt-Geschlebetrieb S = Sohle und Böschung; Hk = Hanginput <20'000 m ³ ; Hg = Hanginput >20'000 m ³ ;	Geschlebetrieb am Kegehnals [m ³] Quellen siehe Factsheets
1	Glyssibach	Brienz	BE	646660	179128	1.60	2040	744	1349	40	Ka	22./23.8.2005	L	MG	Hg/S	50'000-60'000
2	Sandbach	Grindelwald	BE	645069	163135	2.30	3687	960	2079	35	Ka	17.8.1989	G	GT	S	5'000-6'000
3	Schwendibach	Grindelwald	BE	643114	164855	11.00	2755	930	1968	26	Ka	22./23.8.2005	L	MG	Hk/S	15'000
4	Rotlaufbach	Guttannen	BE	666387	167111	3.90	3154	1259	2328	40	Kr	22./23.8.2005	L	MG	PG/S	250'000-300'000
5	Schwarzbächli	Lauenen	BE	591586	140834	3.50	2472	1260	1774	20	F	15.5.1999	L	MG	Hg/S	5'000
6	Rote Bach	Lauterbrunnen	BE	635590	152438	1.50	3808	1285	2582	39	Kr	4.8.2004	NU	MG	PG/S	30'000-35'000
7	Tanzhobelbächli	Lauterbrunnen	BE	635434	151779	2.50	3893	1460	2635	39	Kr	8.9.2006	L	MG	S	10'000-13'000
8	Indrist Weid Bach	Lauterbrunnen	BE	636550	159514	0.18	1618	809	1380	33	Ka	22./23.8.2005	L	MG	Hk/S	1'000-2'000
9	Spissibach	Leissigen	BE	626013	166914	2.60	2200	600	1314	28	F	25.3.1955	L	MG	Hk/S	5'000-10'000
10	Fellbach	Lütschental	BE	638236	165378	0.25	1840	753	1397	39	Ka	22./23.8.2005	L	MG	Hk/S	4'000-5'000
11	Louwibach	Lütschental	BE	638439	165362	2.50	2570	782	1988	32	Ka	22./23.8.2005	L	MG	S	6'000
12	Spisgraben	Lütschental	BE	638642	165384	0.17	1620	801	1306	38	Ka	22./23.8.2005	L	MG	Hk/S	2'000-3'000
13	Wartenberggraben	Lütschental	BE	640718	165142	1.70	2570	842	1901	31	Ka	22.8.2005	L	MG	Hk/S	5'000-10'000
14	Milbach	Meringen	BE	657854	175483	3.90	2240	640	1543	23	Ka	22./23.8.2005	L	MG	Hk/S	25'000
15	Beteliedgraben	Zweisimmen	BE	596698	154603	11.50	2473	1025	1740	27	F	13.5.1999	L	MG	Hk/S	15'000-20'000
16	Riggisalpbach	Schwarzsee	FR	589050	168494	3.70	2180	1120	1571	26	F	11.8.1997	G	MG	S	10'000
17	Chummerbach	Davos	GR	778688	180804	6.20	2778	1600	2282	25	Ka/Kr	15.8.1998	G	MG	Hk/S	40'000
18	Alpenbach	Davos	GR	784189	176201	1.40	3005	1981	2525	28	Ka	28.7.2006	G	MG	Hk/S	14'000
19	Schwenditobel	Grüsch	GR	766021	204009	2.40	1770	762	1322	27	F	21./22.5.1999	L	MG	Hk/S	2'000-3'700
20	Val da Dusch	Paspals	GR	753895	180221	3.40	2494	926	1639	32	F	16.11.2002	L	GT	Hk/S	10'000-12'000
21	Vadret da l'Alp Ota	Pontresina	GR	785649	143618	0.60	3429	2100	3032	26	Kr	11.7.2006	NU	MG	PG/S	15'000-20'000
22	Val Varuna	Poschhio	GR	800720	135340	6.40	3435	1180	2195	29	Kr	18./19.7.1987	L	MG	PG/Hg/S	200'000
23	Val Valdaun	Rueun	GR	730550	182294	4.70	2291	780	1544	22	Ka	16.11.2002	L	MG	S	56'000-71'000
24	Piaunca	Schians	GR	721541	178888	4.70	3100	820	1960	26	Kr	18./19.7.1987	L	MG	Hk/S	ca. 250'000
25	Val Farbertg	Trun	GR	719586	178553	1.80	2480	900	1658	27	Kr	16.11.2002	L	MG	Hk/S	24'500-33'000
26	Val Gronda	Tschlin	GR	829991	196770	5.10	3035	1100	2042	24	F	10.8.2001	G	MG	S	10'000
27	Laigraben	Stans	NW	689805	200150	0.83	1820	660	1282	34	Ka	22.8.2005	L	MG	S	2'000
28	Humilgenbach	Wolfschliessen	NW	673612	196379	1.30	1870	641	1302	32	Ka/F	22.8.2005	L	MG	Hk/S	10'000-15'000
29	Haltibach	Wolfschliessen	NW	674812	193429	2.90	2255	887	1539	33	Ka/F	22.8.2005	L	MG	Hg/S	250'000

Nr.	Wildbach	Gemeinde/Ort	Kanton	X Koordinate Kegehals	Y Koordinate Kegehals	Einzugsgebietfläche [km ²]	Höchster Punkt [m ü. M.]	Tiefster Punkt [m ü. M.]	Mittlere Höhe [m ü. M.]	Mittlere Hangneigung []	Hauptgeologie F = Flysch; M = Molasse; Kr = Kristallin; Ka = Kalk; Ka/F	Datum Grossereignis	Hydrol. Auslöser L = Langan. Niederschläge G = Gewitter NU = Niederschlagsunabhängig	Transportprozess MG = Murgang; GT = Geschlebebetrieb	Haupt-Geschlebeherkunft S = Sohle und Böschung; Hg = Hanginput <20'000 m ³ ; Hk = Hanginput >20'000 m ³ ; PG = periglaziales Gebiet	Geschlebebricht am Kegehals [m ³] Quellen siehe Factsheets
30	Weisibach	Alpnach	OW	662518	199430	4.40	2125	503	1473	32	Ka/F	22.8.2005	L	GT	Hk/S	10'000-12'000
31	Mehlbach	Engelberg	OW	674411	186379	0.63	2040	1126	1514	28	Ka	22.8.2005	L	MG	S	3'000
32	Fangtobel	Engelberg	OW	671399	188908	3.50	2588	720	1636	31	Ka	22.8.2005	L	MG	Hk/S	30'000-35'000
33	Melbach	Kerns	OW	666902	196729	3.20	1813	772	1235	24	Ka/F	22.8.2005	L	GT	S	7'000
34	Acherilbach	Kerns	OW	665551	188596	1.90	2340	820	1540	30	Ka/F	22.8.2005	L	MG	Hg/S	120'000-140'000
35	Foribach	Kerns	OW	664202	194377	4.80	2049	590	1225	24	Ka	22.8.2005	L	GT	Hk/S	20'000
36	Dorfbach	Sachseln	OW	661307	190553	3.10	2028	564	1316	35	Ka/F	15.8.1997	G	MG	Hk/S	20'000-25'000
37	Edisriederbach	Sachseln	OW	660381	189785	2.60	2060	560	1365	34	Ka/F	15.8.1997	G	MG	Hg/S	ca. 40'000
38	Filbach	Weesen	SG	726500	222510	8.50	1941	460	1320	29	F	23.5.1999	L	MG	Hg/S	20'000-30'000
39	Usser Dorfbach	Gersau	SZ	682378	205491	0.60	1450	580	983	31	Ka	23.8.2005	L	MG	Hk/S	10'000
40	Ri di Bedretto	Bedretto	TI	682544	151276	4.30	3100	1400	2323	30	Kr	24./25.8.1987	L	GT	S	800-2'700
41	La Guasia	Giubiasco	TI	722717	115825	1.90	1500	300	848	30	Kr	16.11.2002	L	MG	Hk/S	10'000-12'000
42	Donglia	Motto	TI	718014	143221	7.30	2840	448	2052	34	Kr	18./19.7.1987	L	GT	S	1'000-2'500
43	Ri di Ronco	Ronco	TI	681228	150315	3.20	3190	1500	2379	31	Kr	24./25.8.1987	L	MG	PG/S	14'000-20'000
44	Ruchtal	Altdorf	UR	691862	193405	0.97	1820	547	1524	22	Ka/F	14.7.2006	L	MG	S	12'000
45	Holdenbach	Burglen	UR	694963	192937	5.10	2264	703	1567	27	Ka/F	22.8.2005	L	MG	Hk/S	ca. 20'000
46	Näsilalbach	Burglen	UR	693983	192773	0.95	1784	600	1247	33	Ka/F	22.8.2005	L	MG	S	8'000-10'000
47	Chietal	Ersfeld	UR	691330	187070	0.27	1462	515	1050	36	Kr	3.5.2002	L	MG	Hk/S	15'000
48	Tüfelal	Gurtneilen	UR	693362	181704	0.22	1820	680	1240	41	Kr	3.5.2002	L	MG	S	30'000-40'000
49	Gangbach	Spiringen	UR	697098	192761	5.10	2460	820	1715	27	Ka/F	22.8.2005	L	MG	Hg/S	25'000-30'000
50	Rio de Tenneses	Château-d'Oex	VD	576411	147513	1.70	2190	1009	1594	36	Ka	13.2.1995	NU	MG	Hk/S	10'000-12'000
51	Nant du Pissot	Villeneuve	VD	561371	138159	1.00	1767	494	1147	43	Ka	13./14.8.1995	G	MG	S	35'000
52	Saxé	Fully	VS	576104	111010	0.89	2469	520	1375	38	Kr	16./17.11.1939	L	MG	S	150'000
53	Reuses du Dolent	La Folly	VS	573004	86200	6.30	3813	1660	2541	33	Kr	10.7.1990	NU	MG	PG/S	15'000-20'000
54	Dorfbach	Mörel	VS	646457	134095	3.50	2228	800	1735	29	Kr	15.10.2000	L	MG	S	6'000-10'000
55	Minstigenbach	Münster	VS	663270	149000	15.20	3487	1440	2494	30	Kr	24./25.8.1987	L	MG	S	45'000-63'000
56	Bruchi	Naters	VS	642321	134943	4.20	3221	1549	2532	21	Kr	1.7.1995	G	MG	S	15'000-20'000
57	Milibach	Obergesteln	VS	667887	152698	3.80	2873	1482	2356	27	Kr	24./25.8.1987	L	GT	S	1'300-1'800
58	Ritigraben	St. Niklaus	VS	628943	115662	1.40	3127	1068	2166	30	Kr	24.9.1993	L	MG	PG/S	60'000-90'000

Tab. 4-2: Kennzahlen zu den Ereignis-Validierungsgebieten

Nr.	Wildbach	Gemeinde/Ort	Kanton	X-Koordinate Kegelehals	Y-Koordinate Kegelehals	Einzugsgebietsfläche [km ²]	Höchster Punkt [m ü. M.]	Tiefster Punkt [m ü. M.]	Mittlere Höhe [m ü. M.]	Mittlere Hangneigung [°]	Hauptgeologie Kr = Kristallin; Ka = Kalk; F = Flysch; M = Molasse	Datum Grosseereignis	Hydrolog. Auslöser L = Langanh. Niederschläge G = Gewitter NU = Niederschlagsunabhängig	Transportprozess MG = Murgang; GT = Geschiebetrieb	Haupt-Geschieberkunft S = Sohle und Böschung; HK = Hanginput < 20'000 m ³ ; HG = Hanginput > 20'000 m ³ ; PG = periglaziales Gebiet	Geschiebertracht am Kegelehals [m ³] Quellen siehe Factsheets
59	Horbach	Grindelwald	BE	647883	165215	1.90	2589	1280	2054	20	Ka/F	22./23.8.2005	L	MG	Hk/S	2'000-3'000
60	Stegenbach	Kandergrund	BE	618558	152545	5.70	2857	1020	2087	33	Ka	15.7.1987	L	MG	Hk/S	10'000-26'000
61	In. Blindlauigraben	Lütschental	BE	638695	165114	0.26	2210	711	1622	45	Ka	22./23.8.2005	L	GT	S	300-500
62	Seebach	Klosters	GR	796045	193435	9.10	3121	1673	2458	31	Kr	23.8.2005	L	MG	PG/S	20'000
63	Riale Lant	Pian San Giacomo	GR	736905	144025	0.92	2837	1344	2166	44	Kr	29.6.2008	G	MG	S	45000
64	Rabiusa	Rabius	GR	716295	177686	5.30	3069	1051	2115	32	Kr	18.7.1987	L	GT	Hk/S	2'600-6'000
65	Val Fless	Susch	GR	796095	183426	7.00	3016	2118	2538	29	Kr	22.8.2005	L	MG	PG/S	30'000-40'000
66	Ferrera	Trun	GR	718035	178714	13.60	3420	997	2370	36	Ka/Kr	18./19.7.1987	L	MG	S	4'000-10'000
67	Sinzera	Trun	GR	718915	178595	3.10	3217	935	2167	32	Kr	17./18.7.1987	L	MG	Hk/S	14'000-40'000
68	Buholzbach	Oberdorf	NW	673382	198155	13.50	2403	558	1504	28	Ka/F	21./22.8.2005	L	GT	Hk/S	70'000
69	Steinibach	Dallenwil	NW	671590	197406	10.50	1945	667	1302	24	Ka/F	21./22.8.2005	L	GT	Hk/S	36'000
70	Dürbach	Engelberg	OW	675184	186444	18.60	2877	1050	2084	29	Ka	21./22.8.2005	L	MG	S	20'000
71	Firrerengraben	Kems	OW	664425	191984	0.07	1530	785	1281	30	Ka	22.8.2005	L	MG	S	20'000
72	Ri Bassengo	Faido	TI	705655	148345	4.90	2657	818	1839	27	Kr	18.7.1987	L	MG	Hk/S	6'000-11'000
73	Grosslualtal	Wassen	UR	689635	174046	1.00	2476	868	1831	44	Kr	2.5.2002	L	MG	S	8'000-10'000
74	Eau Froide	Roche	VD	561205	134626	14.10	2329	428	1533	27	Ka	8.8.2007	G	MG	S	15'000
75	Torrent Sec	Collonges	VS	588809	115256	1.90	2896	499	1702	38	F/Ka/Kr	29.6.2008	G	MG	S	20'000
76	Le Durmand	Martigny	VS	571894	100915	9.00	2873	966	2066	34	Kr	25.7.2006	G	MG	S	25'000-30'000
77	Minstigerbach	Münster	VS	663270	149000	15.20	3487	1440	2494	30	Kr	21.8.2008	NU	MG	PG/S	30'000-40'000
78	Spisszug	St. Niklaus	VS	627330	113055	2.60	3301	1279	2517	43	Kr	7.9.2006	G	MG	S	8'000

Tab. 4-3: Kennzahlen zu den Abschätzungs-Validierungsgebieten

Nr.	Wildbach	Gemeinde/Ort	Kanton	X-Koordinate Kegehals	Y-Koordinate Kegehals	Einzugsgebietstfläche [km ²]	Höchster Punkt [m ü. M.]	Tiefster Punkt [m ü. M.]	Mittlere Höhe [m ü. M.]	Mittlere Hangneigung [°]	Hauptgeologie
79	Trachtbach	Brienz	BE	645474	178855	1.40	1912	655	1180	36	Ka
80	Leimbach	Frutigen	BE	615075	160515	1.60	2390	1002	1649	36	F
81	Wärjistabach	Grindelwald	BE	644214	163314	13.40	3969	971	1951	25	Ka/F
82	Rutigraben	Gsteigwiler	BE	633906	166424	0.54	1863	736	1375	44	Ka
83	Eislenbach	Hofstetten	BE	649334	179015	4.00	2203	744	1511	33	Ka
84	Schützengraben	Larignau	BE	626706	199376	0.93	979	711	829	18	M
85	Gryfenbach	Lauterbrunnen	BE	635624	160755	1.60	2339	895	1660	32	Ka
86	Spissbach	Lauterbrunnen	BE	635892	159125	1.80	2559	872	1807	28	Ka
87	Eybach	Leissigen	BE	626324	166886	2.80	2246	610	1309	33	F
88	Büetschligraben	Schangnau	BE	634505	184637	2.30	2195	928	1457	30	M
89	Lammbach	Schwanden	BE	648094	179155	2.10	2201	816	1460	35	Ka
90	Guppenuns	Schwanden	GL	723515	207145	2.90	2902	731	1683	41	Ka
91	Steinbach	Hergiswil	NW	665757	204406	3.50	2117	548	1235	24	Ka/F/M
92	Diesselbach	Kerns	OW	665183	187775	2.30	2381	866	1775	33	Ka
93	Wichelsgraben	Lungern	OW	653743	181856	0.13	1538	795	1175	40	Ka
94	Sigetsbach	Sachseln	OW	659695	189575	2.70	2097	550	1365	34	Ka/F
95	Bitzghoferbach	Sarnen	OW	661384	195075	3.40	1681	491	1091	19	F
96	Schwandbach	Sarnen	OW	659505	192246	5.10	1736	538	1147	16	F
97	Tellenbach	Sarnen	OW	661804	196295	1.10	1461	498	911	24	F
98	Gangbach	Schattdorf	UR	693004	190776	10.90	2505	541	1595	27	Ka
99	Dorfbach	Randa	VS	627044	106024	5.70	4475	1532	2986	34	Kr
100	Grosse Grabu	St. Niklaus	VS	627714	111326	1.00	3141	1377	2463	41	Kr
101	Steinbach	Fiühli	LU	644268	195055	4.40	1974	877	1311	25	F/M

F = Flysch; M = Molasse
Kr = Kristallin; Ka = Kalk;

4.2 Überblick Naturraum

Wie in Tab. 3-1 ersichtlich, wurde bei der Auswahl der Stichprobe darauf geachtet, dass die Analyse und Validierungsgebiete möglichst heterogene Verhältnisse besitzen, damit ein möglichst breites Spektrum an verschiedenen Gebietseigenschaften abgedeckt wird. Die folgenden Kap. 4.2.1 bis Kap. 4.2.4 zeigen einen Überblick über die Verteilungen von Einzugsgebietsgrösse, mittlere Gebietshöhe und Hangneigung sowie der Hauptgeologien der ausgewählten Untersuchungsgebiete.

4.2.1 Einzugsgebietsgrösse

Abb. 4-2 zeigt die Verteilung der Einzugsgebietsgrössen der Untersuchungsgebiete. Der grösste Teil der Analysegebiete hat eine Einzugsgebietsfläche kleiner als 8 km². Bei der Validierung wurde darauf geachtet, dass auch Einzugsgebiete mit grösserer Fläche getestet wurden. Das Ziel dabei war, die Grenzen der Anwendbarkeit des Abschätzverfahrens auszuloten.

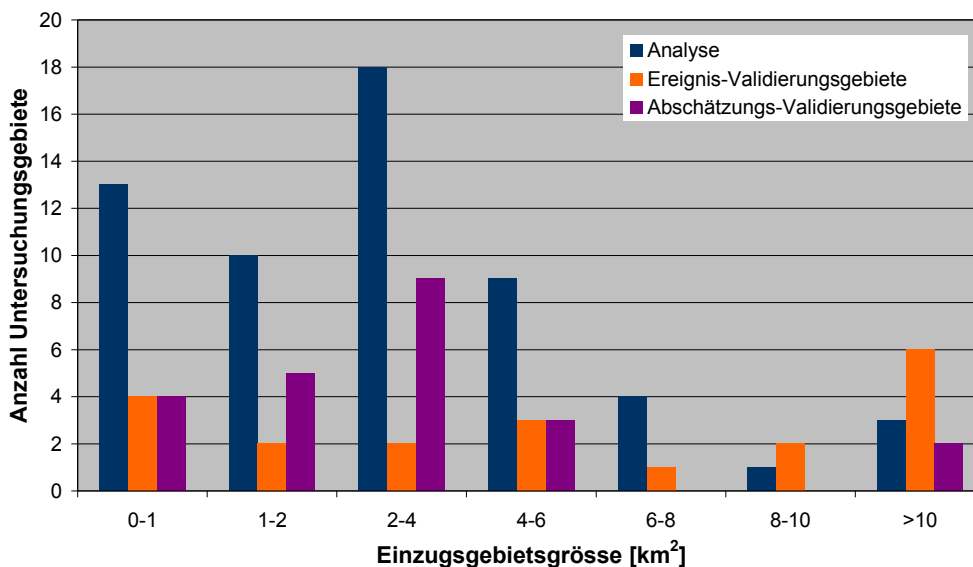


Abb. 4-2: Verteilung der Einzugsgebietsgrössen der Untersuchungsgebiete

4.2.2 Mittlere Hangneigung

Abb. 4-3 zeigt die Verteilung der mittleren Hangneigungen in den Untersuchungsgebieten. Der Schwerpunkt liegt bei den Analysegebieten bei mittleren bis steilen Einzugsgebieten mit mittleren Hangneigungen von 25° bis 35°. Bei der Auswahl der Validierungsgebiete wurden bewusst auch flachere und sehr steile Gebiete berücksichtigt, um auch hier die Grenzen der Anwendbarkeit des Geschiebeabschätzverfahrens zu testen.

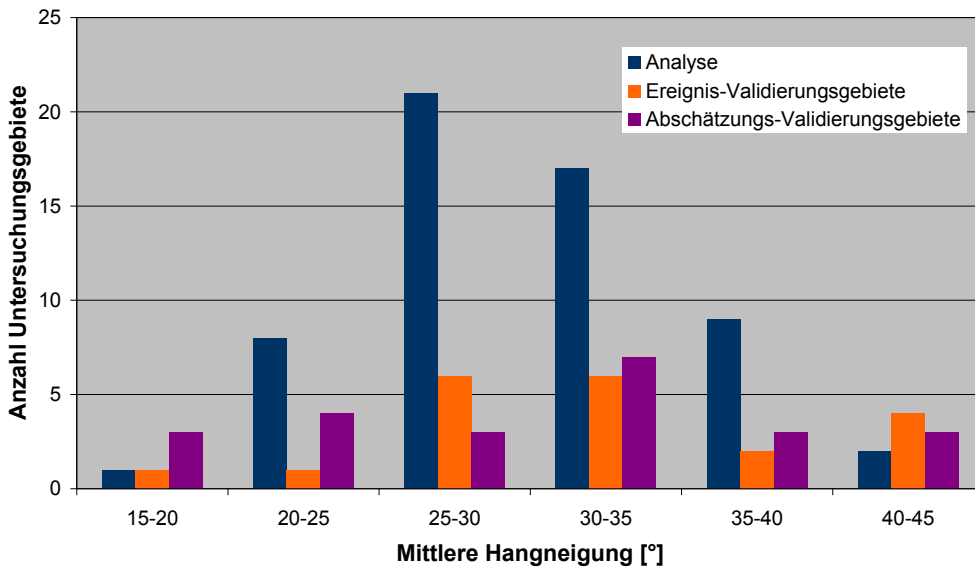


Abb. 4-3: Verteilung der mittleren Hangneigungen in den Untersuchungsgebieten

4.2.3 Mittlere Gebietshöhe

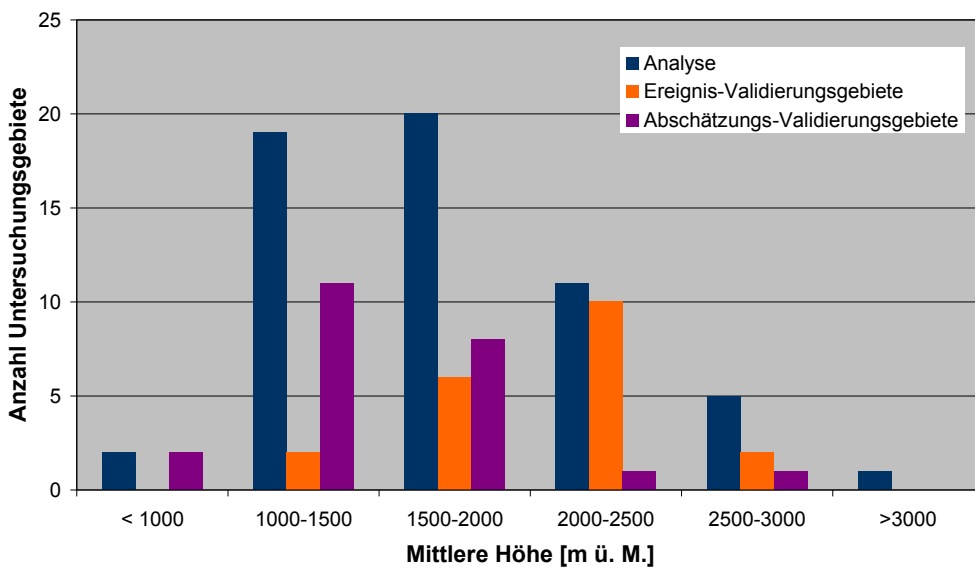


Abb. 4-4: Verteilung der mittleren Gebietshöhen in den Untersuchungsgebieten

In Abb. 4-4 ist die Verteilung der mittleren Gebietshöhen in den Untersuchungsgebieten ersichtlich. Diese befinden sich bei den Analysegebieten hauptsächlich in den typischen Höhenlagen der Voralpen und Alpen. Wildbäche im Hügelland des Emmentals und des Mittellands wurden nur in Einzelfällen betrachtet.

4.2.4 Hauptgeologie

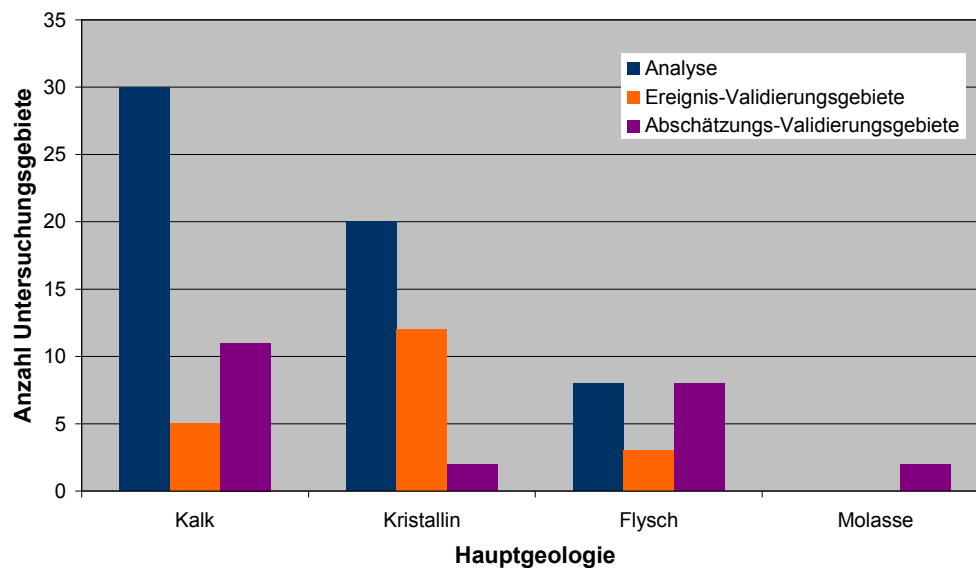


Abb. 4-5: Verteilung der Hauptgeologien in den Untersuchungsgebieten

Abb. 4-5 zeigt die Hauptgeologien der Untersuchungsgebiete. Bei den Analysegebieten sind nur die drei Hauptgeologien Kalk, Kristallin und Flysch vertreten, wobei die Kalkgebiete vorherrschen. Der Grund liegt darin, dass die Grossereignisse, welche im August 2005 abgelaufen sind, einen grossen Teil der Stichprobe der Analysebäche ausmachen (38 %) und sich das Haupt-Schadensgebiet dieses Hochwasserereignisses im Kalkgebiet befunden hat. Molassebäche wurden keine untersucht, da keine detaillierten Ereignisdokumentationen gefunden werden konnten.

4.3 Überblick Grossereignisse

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die zeitliche und saisonale Verteilung der analysierten Grossereignisse der Analysegebiete und Ereignis-Validierungsgebiete gegeben werden. Eine Zusammenstellung der bei den Grossereignissen beobachteten Transportprozesse und hydrologischen Auslösern ergänzen diesen Überblick.

4.3.1 Zeitlicher und saisonaler Überblick

Die 58 Grossereignisse in den Analysegebieten und die 20 Grossereignisse der Ereignis-Validierungsgebiete sind in Abb. 4-6 auf einer Zeitachse aufgetragen. Neben vielen Einzelergebnissen in verschiedensten Jahren, wurden besonders Grossereignisse der folgenden bekannten ereignisreichen Schadensjahre berücksichtigt:

- 1987 im Juli/August nach einem sehr feuchten Sommer in den Regionen Surselva, Tessin, Goms und Berner Oberland
- 1999 im Mai nach intensiver Schneeschmelze (Lawinenwinter) und Starkniederschlägen
- 2002 im November nach langanhaltenden intensiven Niederschlägen in der Surselva und dem Tessin

- 2005 im August nach langanhaltenden intensiven Niederschlägen in der gesamten Schweiz, mit Schadenswerpunkten im Berner Oberland, der Zentralschweiz und in Graubünden

26 der insgesamt 58 Grossereignisse der Analysegebiete liefen während der Projektdauer zwischen 2004 und 2009 ab. Für sie konnten eigene detaillierte Erhebungen der Geschiebebilanzen im Einzugsgebiet erstellt werden, bei den restlichen wurde auf bestehende Dokumentationen zurückgegriffen.

14 der 20 Grossereignisse der Ereignis-Validierungsgebiete ereigneten sich zwischen 2004 und 2009. Insbesondere alle aktuellen Grossereignisse in den Jahren 2007 und 2008 wurden als Grossereignisse für die Validierung verwendet, da zu diesem Zeitpunkt die Analysen bereits fortgeschritten waren und keine neuen Ereignisse mehr integriert werden konnten.

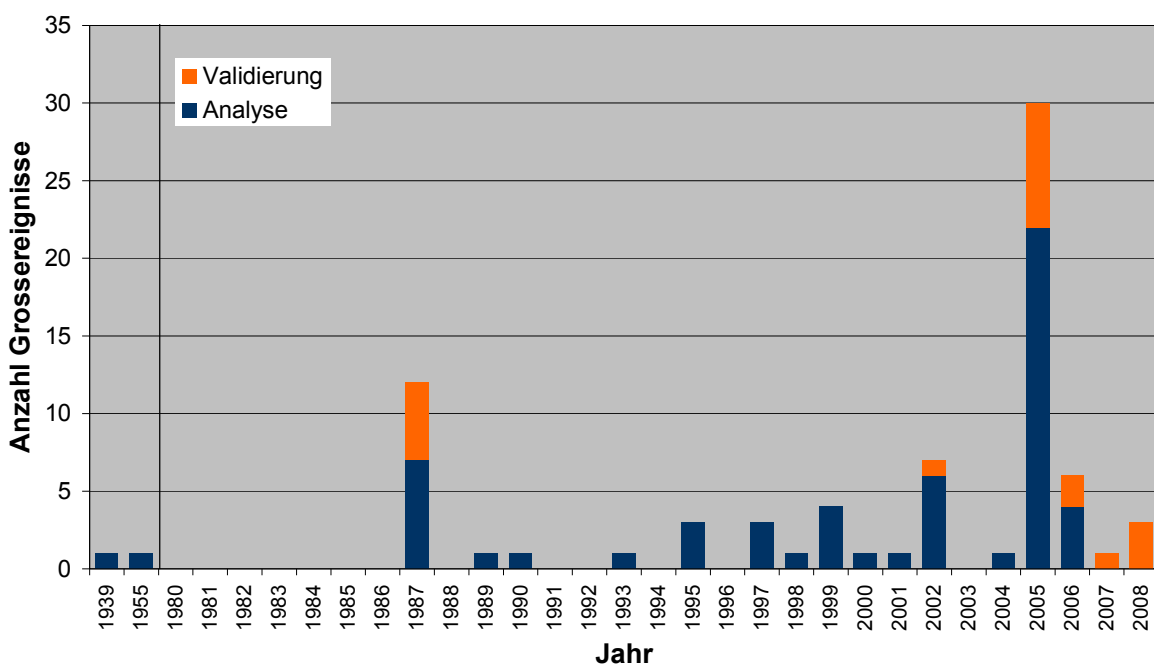


Abb. 4-6: Zeitliche Verteilung der untersuchten Grossereignisse

Die saisonale Verteilung der untersuchten Grossereignisse ist in Abb. 4-7 ersichtlich. Der Hauptschwerpunkt liegt in den Monaten Mai bis August. Vertreten sind jedoch auch einige wenige Grossereignisse in Winter- und Frühlingsmonaten, bei welchen insbesondere Schnee oder Schneeschmelze eine wichtige Rolle beim Ereignisablauf gespielt haben.

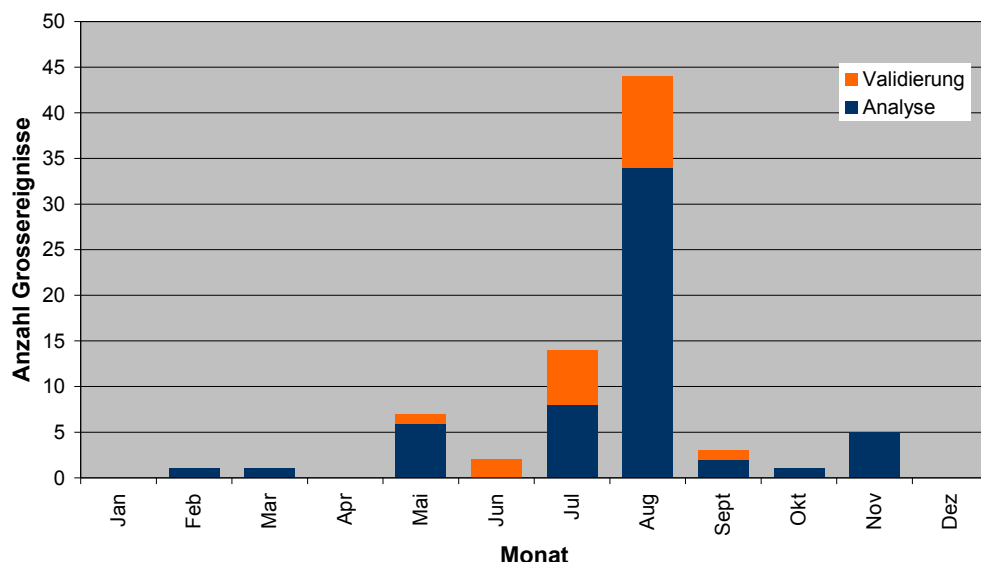


Abb. 4-7: Saisonale Verteilung der untersuchten Grossereignisse

4.3.2 Hydrologischer Auslöser

Abb. 4-8 zeigt die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen hydrologischen Auslösebedingungen der 58 Analysegebiete. 4 Grossereignisse wurden niederschlagsunabhängig ausgelöst, 9 Grossereignisse durch Gewitter und 45 Grossereignisse durch langanhaltende intensive Niederschläge, diejenigen in den Monaten März und Mai im Zusammenhang mit intensiver Schneeschmelze.

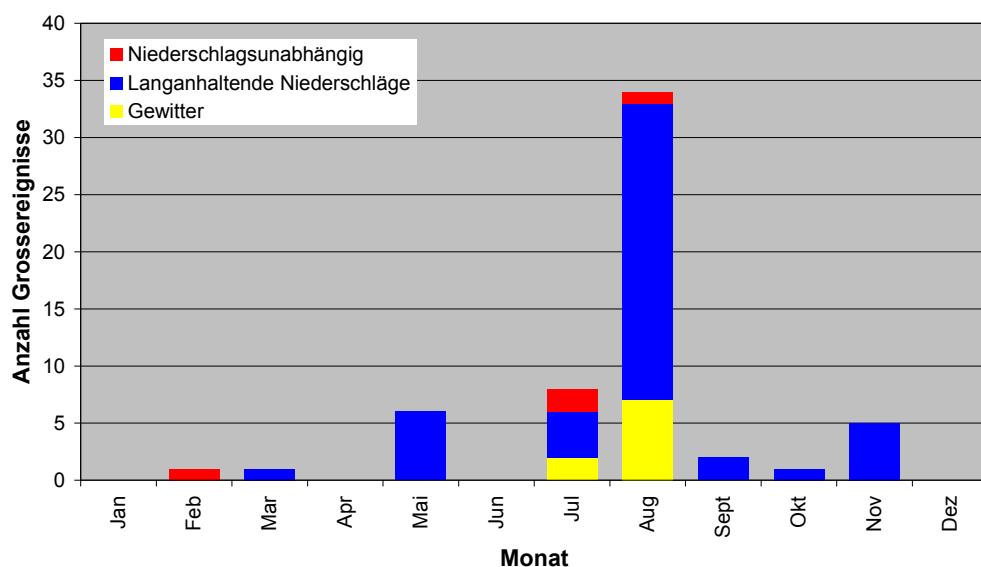


Abb. 4-8: Hydrologischer Auslöser der Analyseebäche

Die grosse Anzahl der analysierten Grossereignisse ausgelöst durch langanhaltende intensive Niederschläge hat seine Ursache bei der Auswahl der Stichprobe (vgl. Kap. 3.2). Von Grossereignissen, die vor Projektbeginn abgelaufen sind, musste als Voraussetzung, um in die Stichprobe aufgenommen zu werden, eine detaillierte Ereignisdokumentation vorhanden sein. Detaillierte Ereignisdokumentationen und –analysen werden oft nur bei grossräumigen und scha-

densreichen Hochwasserereignissen von Bund und Kantonen in Auftrag gegeben. Für solche grossräumigen Ereignisse sind meistens langanhaltende intensive Niederschläge verantwortlich, so z.B. bei den Ereignissen von 1987 oder 2002. Bei den analysierten Grossereignissen, die während der Projektdauer abgelaufen sind, machen die Augustereignisse 2005 einen grossen Anteil aus. Auch diese wurden durch langanhaltende intensive Niederschläge ausgelöst.

In Abb. 4-9 sind die hydrologischen Auslöser der 20 Grossereignisse in den Ereignis-Validierungsgebieten ersichtlich. Auch hier ist eine stärkere Gewichtung der langanhaltenden intensiven Niederschläge vorhanden.

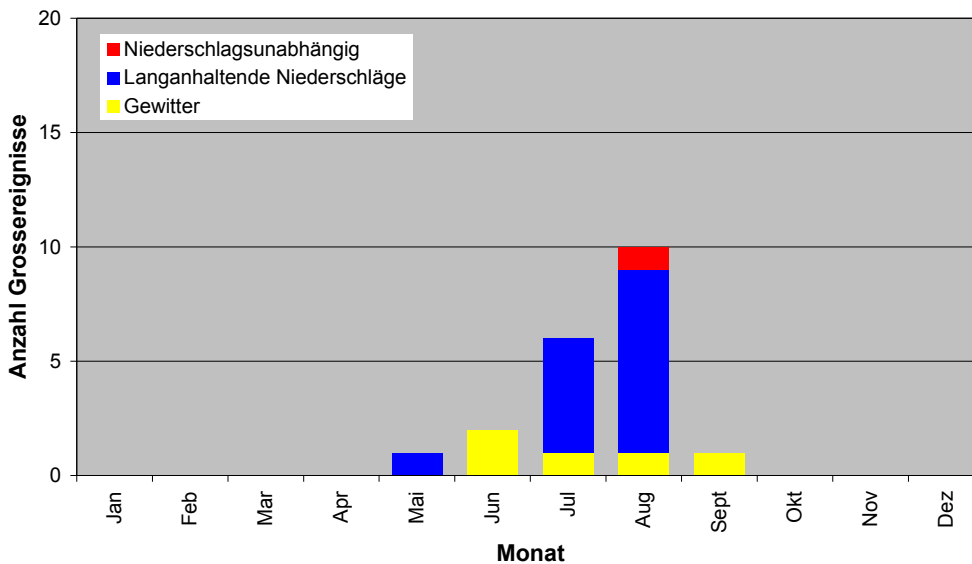


Abb. 4-9: Hydrologischer Auslöser der Grossereignisse in den Ereignis-Validierungsbächen

4.3.3 Transportprozess

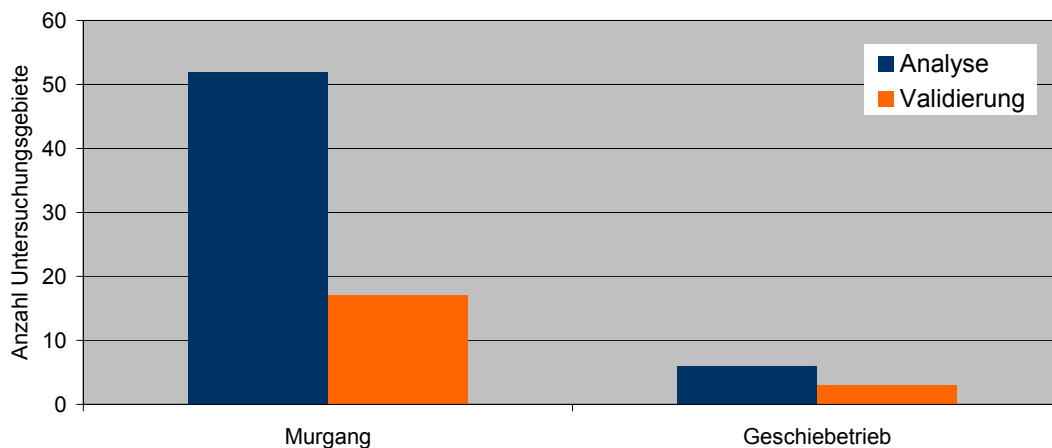


Abb. 4-10: Vorherrschender Transportprozess bei den untersuchten Grossereignissen

Bei 52 der 58 Grossereignisse der Analysebäche wurde Murgang- oder murgangähnlicher Geschiebetransport beobachtet, bei 6 Grossereignissen reiner fluvialer Geschiebetrieb (vgl. Abb. 4-10). Bei den Validierungsereignissen konnte in 17 von 20 Fällen Murgang- oder murgangähnlicher Transport dokumentiert werden.

5 Blickwinkel bei der systembasierten Wildbachbeurteilung

5.1 Zu den Begriffen Komplexität und System

Wildbachsysteme sind komplex. „Komplexität hat sehr viel mit Vernetzung zu tun, ja kommt erst durch Vernetzung zustande. Komplexe Vorgänge verlangen daher zu ihrem Verständnis ein Denken in Zusammenhängen, das sich an der Struktur organisierter Systeme und ihrer speziellen Dynamik orientiert.“ (Vester 2002)

Folgende Ausführungen zum Begriff System stammen aus Wikipedia (2008):

„Ein System (von griechisch „das Gebilde, Zusammengestellte, Verbundene“) ist eine Gesamtheit von Elementen, die so aufeinander bezogen sind und in einer Weise wechselwirken, dass sie als eine aufgaben-, sinn- oder zweckgebundene Einheit angesehen werden können und sich in dieser Hinsicht gegenüber der sie umgebenden Umwelt abgrenzen.

Jedes System besteht aus Elementen (Komponenten, Subsystemen), die zueinander in Beziehung stehen. Meist bedeuten diese Relationen ein wechselseitiges Beeinflussen – aus der Beziehung wird ein Zusammenhang.

Bei Systemen unterscheidet man die Makro- und die Mikroebene: Auf der Makroebene befindet sich das System als Ganzes. Auf der Mikroebene befinden sich die Systemelemente. Strukturierung, Eigenschaften und Wechselwirkungen der Elemente auf der Mikroebene bestimmen die Eigenschaften des Gesamtsystems auf der Makroebene. Diese von der Mikroebene bestimmten Eigenschaften des Gesamtsystems bilden zugleich strukturelle Rahmenbedingungen, die steuernd auf die Elemente der Mikroebene einwirken.

Die Beziehungen (Relationen) zwischen den Elementen der Mikroebene sind Wirkungen von Austauschprozessen, wie zum Beispiel Stoff-, Energie- oder Informationsflüssen.“

5.2 Struktur des Wildbachsystems in dieser Arbeit

In dieser Arbeit wird ein Wildbachsystem wie folgt verstanden (vgl. auch Abb. 5-1):

Systemgrenze

Die Systemgrenze ist bei Wildbachsystemen im Normalfall (ausser z. B. im Fall von Karstgebieten) relativ einfach abgrenzbar. Sie ist gegeben durch die räumliche Abgrenzung der Einzugsgebietsgrenze und dem Kegelhals.

Systemelemente

Als Systemelemente werden verschiedene homogene Gerinneabschnitte inklusive ihren angrenzenden Hängen verstanden, welche in gegenseitiger Wechselwirkung stehen. Dabei sind die Wechselwirkungen einseitig und durch das Relief gegeben: Höher im Einzugsgebiet gelegene Gerinneabschnitte wirken auf unterhalb liegende Gerinneabschnitte resp. obere Gerinneabschnitte beeinflussen unterhalb liegende Gerinneabschnitte. Unterhalb liegende Gerinneabschnitte beeinflussen unterhalb liegende Gerinneabschnitte.

neabschnitte wirken nur in Ausnahmefällen auf oberhalb liegende Gerinneabschnitte, nämlich im Fall von rückschreitender Erosion.

Unbeeinflusst von anderen Systemelementen sind die jeweils obersten Gerinneabschnitte (gelb in Abb. 5-1). Diese unbeeinflussten Systemelemente werden in der Folge „Erstabschnitte“ genannt. Beeinflusst von anderen Systemelementen sind alle Gerinneabschnitte, die nicht zu oberst liegen (blau in Abb. 5-1), sie werden in der Folge „Unterlieger-Abschnitte“ genannt. Je weiter unten im Wildbachsystem ein Unterlieger-Abschnitt liegt, umso stärker und komplexer kann (aber muss nicht) die Beeinflussung von oberhalb liegenden Gerinne- und Hangabschnitten sein.

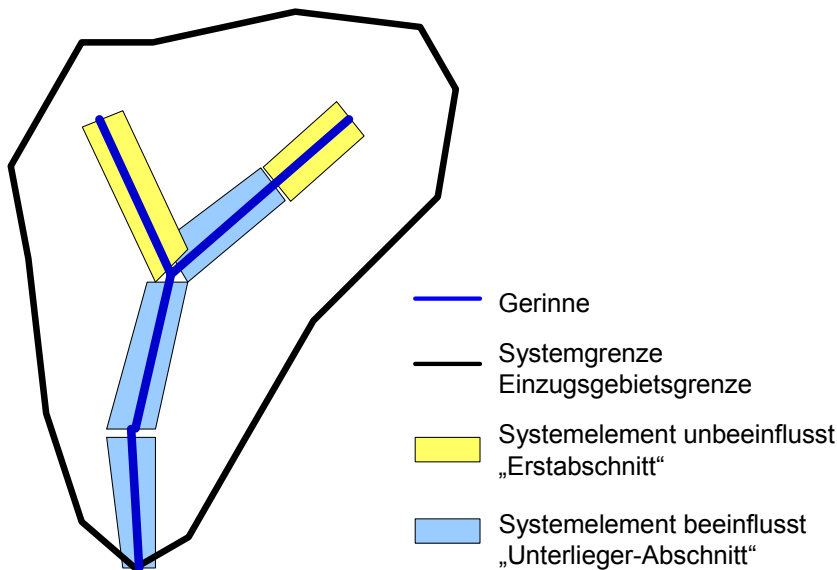


Abb. 5-1: Schematische Darstellung des Wildbachsystems mit Systemgrenze und Systemelementen

5.3 Stabilität eines Wildbachsystems

Im Zusammenhang mit Grossereignissen in Wildbachsystemen ist die Stabilität eines Wildbachsystems ein wichtiger Gesichtspunkt. Grossereignisse sind seltene Ereignisse mit ausserordentlichen Ereignisabläufen.

Je nach Art des Systems kann es passieren, dass in einem System durch ein Überschreiten eines Schwellenwerts ein Kippeffekt entsteht, der das System anders reagieren lässt, als es üblicherweise der Fall ist. Kienholz et al. (2008) sprechen in diesem Fall von „Schwellenprozessen“ oder eher selten eintretenden „Prozesskombinationen und -ketten“. Die Anfälligkeit zu solchen Schwellenprozessen kann synonym durch die Begriffe Gleichgewicht oder Robustheit beschrieben werden. Unterschieden werden in dieser Arbeit stabile und labile Wildbachsysteme.

- Bei **stabilen Systemen** wird davon ausgegangen, dass keine Schwellenprozesse möglich sind. Das System ist also robust und hat ein gutes Gleichgewicht.
- Bei **labilen Systemen** wird davon ausgegangen, dass aufgrund bestimmter Eigenschaften einzelner oder mehrerer Systemelemente Schwellenprozesse möglich sind. Das System hat also ein beschränktes Gleichgewicht und reagiert sensibel.

5.4 Blickwinkel für das Verständnis des Geschiebehaushalts im System

Wenn die Prozesse, die sich in einem einzelnen Systemelement (Gerinneabschnitt) abspielen, vernetzt, in Zusammenhängen denkend und auf ihre Komplexität hin umfassend verstanden und beurteilt werden sollen, müssen die folgenden verschiedenen Blickwinkel im Gesamtsystem berücksichtigt werden:

5.4.1 Eigenschaften des Systemelements – lokale Standortfaktoren

In einem ersten Schritt geht es darum, die Eigenschaften des zu verstehenden Systemelements (Gerinneabschnitts) zu betrachten.

Bildlich gesehen steht der/die Experte/in im zu beurteilenden Gerinneabschnitt, hält eine Lupe (vgl. Abb. 5-2) in der Hand und betrachtet fokussiert die Bedingungen in diesem beschränkten Raum, dem homogenen Gerinneabschnitt. Er/sie fragt sich beispielsweise: Wie gross ist das Gefälle? Mit wie viel Abfluss muss ich bei einem Grossereignis rechnen? Welche Materialeigenschaften hat das vorliegende Sohlenmaterial? Gibt es Hangprozesse? Wie ist die Gerinnegeometrie? Welche Spuren vergangener Ereignisse habe ich in diesem Gerinneabschnitt? Kann sich hier ein Murgang bilden oder fortsetzen?

Diese Bedingungen im Systemelement/Gerinneabschnitt werden in der Folge durch den Begriff „lokale Standortfaktoren“ zusammengefasst. Konkrete Einflussfaktoren des Blickwinkels „lokale Standortfaktoren“ werden in Kap. 6.1 erläutert.

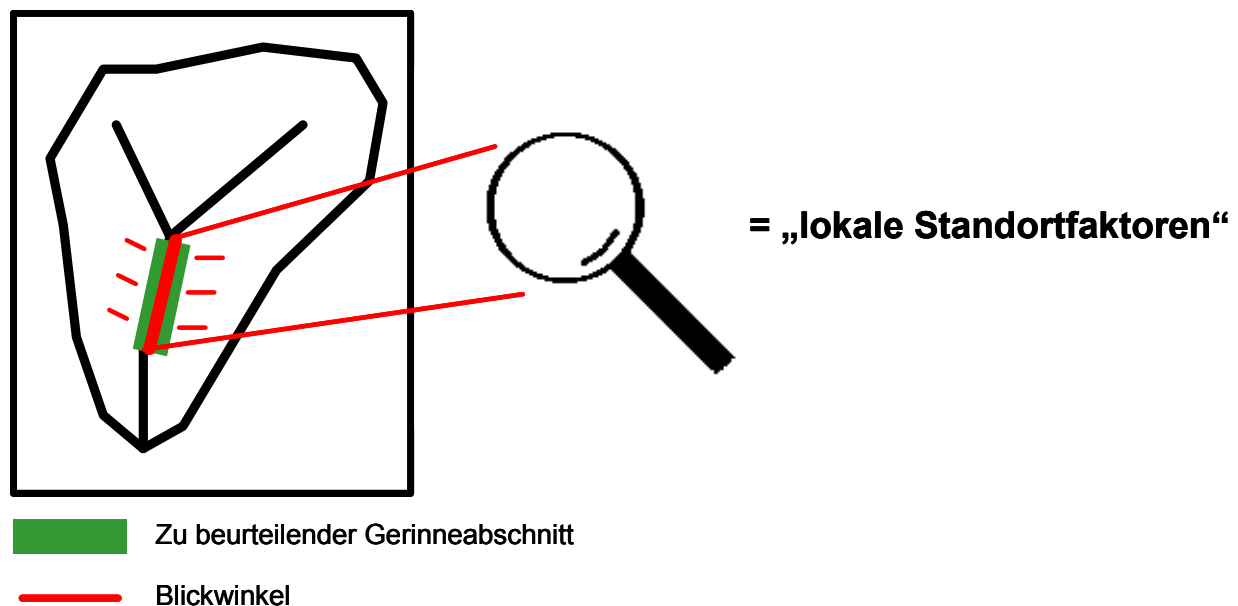


Abb. 5-2: Betrachtung der „lokalen Standortfaktoren“ mit Lupe

5.4.2 Wechselwirkungen der Systemelemente - Bedingungen oberhalb

In einem zweiten Schritt geht es bei Unterlieger-Abschnitten, welche ja von anderen Systemelementen beeinflusst werden können, darum, die Wirkungen der oberhalb liegenden Systemelementen auf das zu betrachtende Systemelement abzuklären.

Bildlich gesehen steht der/die Experte/in immer noch im selben Gerinneabschnitt, nimmt den Feldstecher aus dem Rucksack und blickt hinauf ins obere Einzugsgebiet und zwar sowohl in die Hänge als auch in das Gerinne. Er/sie fragt sich dabei beispielsweise: Kommt ein Murgang von oben oder handelt es sich nur um Geschiebetrieb? Sind die oberhalb liegenden Gerinneabschnitte eher sedimentlimitiert oder abflusslimitiert? Was bedeutet das für die Ausgelastetheit der Transportkapazität beim Eintreffen in diesen Gerinneabschnitt? Wie ist die Neigung im Gerinneabschnitt im Vergleich zu jener im oberen Abschnitt?

Die Berücksichtigung der oberhalb liegenden Systemelemente/Gerinneabschnitte, welche den betrachteten Gerinneabschnitt durch verschiedene Wirkungen beeinflussen, wird in der Folge unter dem Begriff „**Bedingungen oberhalb**“ zusammengefasst. In Kap. 6.2 werden konkrete Einflussfaktoren dieses Blickwinkels vorgestellt.

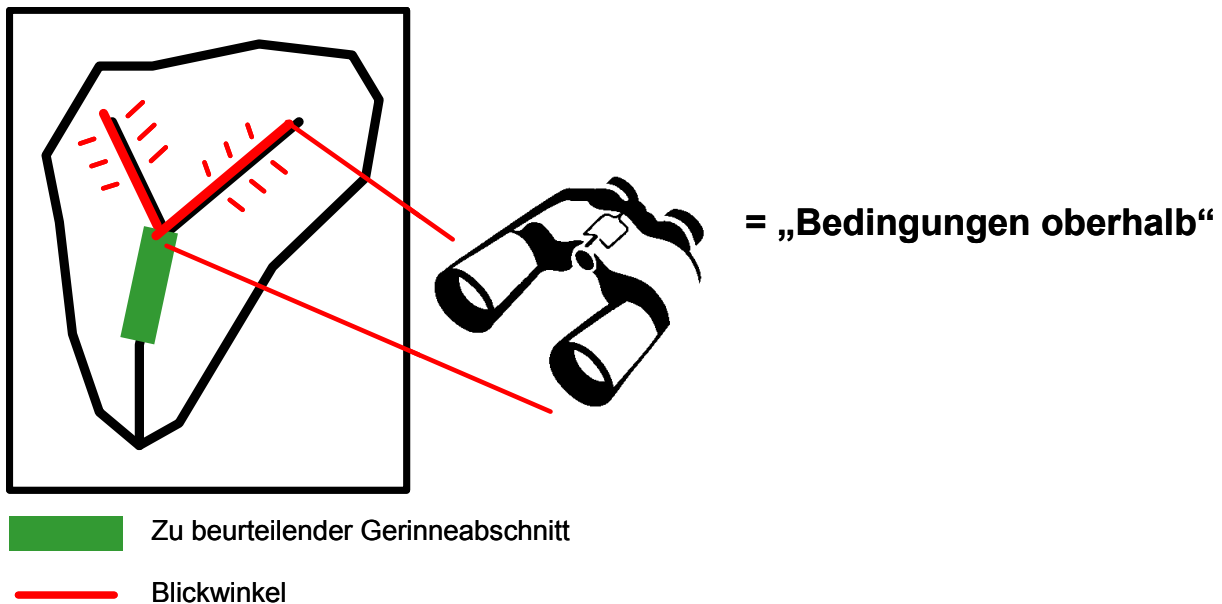


Abb. 5-3: Betrachtung der „Bedingungen oberhalb“ mit Feldstecher

5.4.3 Schwellenprozesse – Negativfaktoren

In einem dritten Schritt geht es darum, sowohl im Systemelement/Gerinneabschnitt als auch die das Systemelement beeinflussenden/oberhalb liegenden Hang- und Gerinneabschnitte hinsichtlich möglicher Schwellenprozesse zu betrachten.

Bildlich gesehen steht der/die Experte/in im zu beurteilenden Gerinneabschnitt. Nachdem er/sie nun die Bedingungen im Gerinneabschnitt selber sowie in den oberhalb liegenden Gerinne- und Hangabschnitten gesehen hat und dadurch das Funktionieren dieses Systems zu kennen glaubt, kneift er/sie die Augen zusammen und lässt einen „Röntgenblick“ über das gesamte Gebiet um sich herum und oberhalb schweifen. Einem Minen-Sucher ähnlich, sucht er/sie nach speziellen Orten und Konstellationen, welche eine „explosive“ Gefahr in sich bergen, die bei seltenen Ereignissen ausgelöst werden kann. Falls eine solche „explosive“ Konstellation gefunden wird, müssen die bisherigen Überlegungen zum Funktionieren des Systems bis zu diesem Gerinneabschnitt hinterfragt und allenfalls angepasst werden. Die Fachperson fragt sich zum Beispiel: Kann im Gletscher oben im Einzugsgebiet eine unterirdische Wassertasche sein, die plötzlich und katastrophenartig ausbricht? Oder ist es allenfalls möglich, dass aus einem Hang eine spontane Rutschung mit einem Volumen von mehreren Zehntausend m³ ausgelöst wird und das Gerinne verklaut? Was passiert, wenn sich aus der steilen, durch Permafrost stabilisierten Schutthalde durch Auftauen ein Murgang ereignet? Reagiert mein zu beurteilender Gerinneabschnitt in diesem Fall immer noch gleich, wie ich mir das vorher vorgestellt habe?

Die Berücksichtigung solcher möglicher Schwellenprozesse, welche das System zu einem anderen Funktionieren bewegen können, wird in der Folge mit dem Begriff „**Negativfaktoren**“ zusammengefasst. Konkrete solche Negativfaktoren werden in Kap. 6.3 näher definiert.

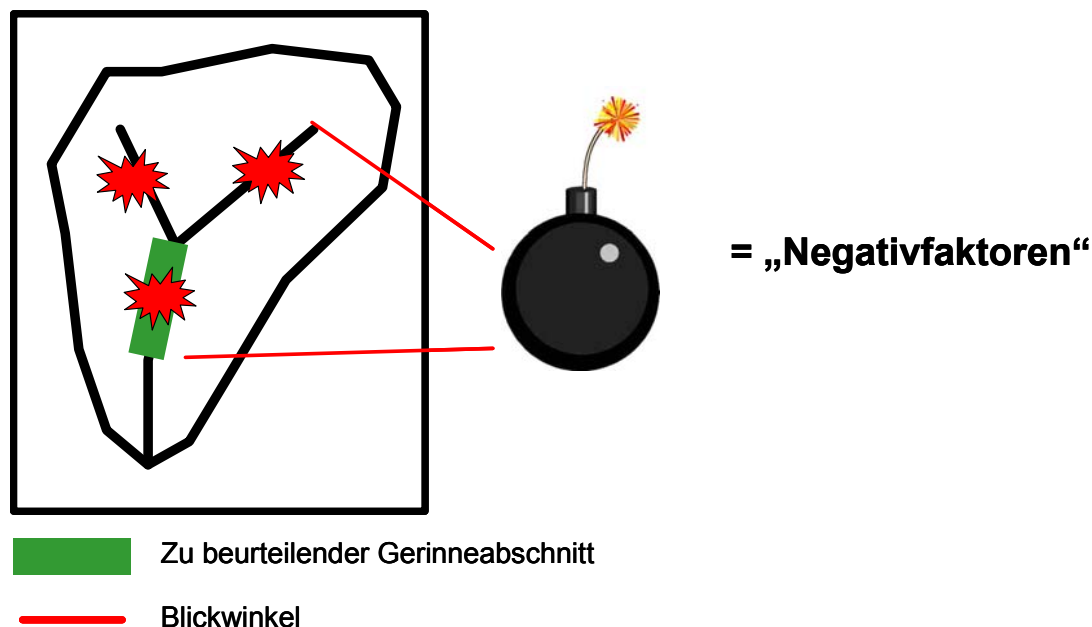





Abb. 5-4: Betrachtung von „explosiven“ Negativfaktoren

5.4.4 Zu berücksichtigende Blickwinkel

Für eine umfassende Betrachtung der Prozesse in einem Systemelement, resp. homogenen Gerinneabschnitt müssen somit, wie in Tab. 5-1 ersichtlich ist, bei Erstabschnitten die lokalen Standortfaktoren und Negativfaktoren berücksichtigt werden. Bei Unterlieger-Abschnitten müssen zusätzlich noch die Bedingungen oberhalb (in Anlehnung an Abb. 5-1) einbezogen werden:

Tab. 5-1: Zu berücksichtigende Blickwinkel bei der Betrachtung der verschiedenen Systemelemente

Systemelement/ Art des Gerinneabschnitts	Blickwinkel		
	Lokale Standortfaktoren 	Bedingungen oberhalb 	Negativfaktoren 
Erstabschnitte	berücksichtigen	Nicht berücksichtigen, da nicht vorhanden	berücksichtigen
Unterlieger-Abschnitte	berücksichtigen	berücksichtigen	berücksichtigen


6 Einflussfaktoren auf den Geschiebehaushalt

Ein Ziel dieser Arbeit ist es u.a., relevante Einflussfaktoren auf den Geschiebehaushalt zu ermitteln (vgl. Kap. 1.1.2). Eine umfassende Beurteilung der Geschiebeprozesse in einem homogenen Gerinneabschnitt kann nur unter Berücksichtigung der 3 verschiedenen Blickwinkel erfolgen, wie vorgängig in Kap. 5 aufgezeigt wurde. Für jeden Blickwinkel wurden massgebende Einflussfaktoren identifiziert. Diese werden in diesem Kap. 6 einzeln vorgestellt. Das kombinierte Wirken aller Einflussfaktoren auf die verschiedenen Geschiebeprozesse im Wildbachsystem sowohl qualitativ als auch quantitativ ist dann Teil von Kap. 7 bis Kap. 9.

6.1 Einflussfaktoren des Blickwinkels „Lokale Standortfaktoren“

Die Einflussfaktoren des Blickwinkels „Lokale Standortfaktoren“ werden unterteilt in Faktoren betreffend des Hangs und Faktoren betreffend des Gerinnes und sind in Tab. 6-1 überblicksmässig aufgelistet. Die einzelnen Einflussfaktoren werden anschliessend detailliert erklärt.

Tab. 6-1: Einflussfaktoren des Blickwinkels „Lokale Standortfaktoren“

	<p>Einflussfaktoren im Hang:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hangneigung • Material und dessen Eigenschaften • Bodenbedeckung • Distanz zum Gerinne • Mündungswinkel in das Gerinne
	<p>Einflussfaktoren im Gerinne:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lockermaterialangebot • Einzugsgebietsfläche oberhalb • Gerinneneigung

6.1.1 Einflussfaktoren im Hang

6.1.1.1 Hangneigung

Die Hangneigung ist ein sehr wichtiger Einflussfaktor für die Disposition von Rutschungen, insbesondere von flachgründigen Rutschungen. Zahlreiche Untersuchungen, z.B. Salter et al. (1981), Rickli (2001), Rickli und Bucher (2003), Werlen (2004) oder Hamberger (2007) haben gezeigt, dass flachgründige Rutschungen grösstenteils bei Hangneigungen zwischen 20° und 45° vorkommen. Bei Hangneigungen <20° ist die Steilheit zu gering, um das Lockermaterial in Bewegung zu setzen, bei steileren Verhältnissen >45° fehlt aufgrund stetiger Denudationsprozesse meistens eine grössere Lockermaterialauflage.

Als quantitatives Mass für die Hangneigung diene in dieser Arbeit die auf der Basis des digitalen Höhenmodells berechnete Hangneigung J_{HANG} [°].

6.1.1.2 Material und dessen Eigenschaften

Sowohl die geologisch-tektonischen Eigenschaften als auch die Lockermaterialeigenschaften üben einen wesentlichen Einfluss auf die Entstehung von Rutschungen auf. Besonders anfällig sind flachgründige Lockermaterialauflagen auf undurchlässigem Fels- oder Moränenuntergrund in steilen Lagen, mächtige Lockermaterialschichten in Gebieten mit weichem tonreichem Fels oder hangparallele Felsstrukturen und unverfestigte Lockermaterialablagerungen.

Wichtig sind zudem die hydrologischen Eigenschaften des Lockermaterials, indem sie die Wasseraufnahmekapazität und Durchlässigkeit steuern. Grosse Aufnahmekapazität und kleine Durchlässigkeit wirken sich negativ auf die Stabilität eines Hangs aus.

Die Materialeigenschaften und hydrologischen Eigenschaften des Lockermaterials beeinflussen in ihrem kombinierten Wirken die Scherfestigkeit in einem Hang.

In dieser Arbeit wurden als qualitatives Mass für die Materialeigenschaften Informationen aus den digitalisierten Geologischen Karten verwendet (vgl. Kap. 3.4.1.3).

6.1.1.3 Bodenbedeckung

Die Bodenbedeckung, insbesondere Wald beeinflusst die Hangstabilität einerseits durch hydrologische Mechanismen, indem die Interzeption und Evapotranspiration die Infiltration des Niederschlagsinputs in den Bodenkörper reduzieren. Zusätzlich entziehen die Wurzeln dem Boden Feuchtigkeit und senken auf diese Weise den Porenwasserdruck. Bei wassergesättigtem Boden verliert Wald allerdings an Wirkung.

Andererseits wirkt die Vegetation auch mechanisch auf die Hangstabilität bis in eine Tiefe von 2-3 m, indem die Wurzeln den Boden armieren und dadurch die Scherfestigkeit erhöhen und die Erosionsanfälligkeit reduzieren. Pflanzen, die dem Wind ausgesetzt sind, können jedoch die dynamischen Kräfte in den Boden übertragen und den Boden dabei auflockern, was sich negativ auf die Stabilität auswirken kann (nach Greenway 1987).

Als qualitatives Mass für die Bodenbedeckung im Hang wurden die verschiedenen Klassen des Primärdatensatzes verwendet (vgl. Kap. 3.4.1.4).

6.1.1.4 Distanz zum Gerinne

Die Distanz der ausgelösten Rutschungen zum Gerinne ist ein entscheidender Faktor für die Relevanz der verlagerten Geschiebekubatur bezüglich der Geschiebefracht im Gerinne. Je weiter entfernt vom Gerinne eine Rutschung ausbricht, umso weniger wahrscheinlich ist es, dass die Kubatur im Gerinne geschieberelevant wird. Die Distanz ist jedoch zusätzlich gekoppelt mit der Hangneigung und dem Einschnitt des Gerinnes. Je tiefer eingeschnitten ein Gerinne ist, umso steiler sind die Hänge und umso grösser kann die Distanz von Rutschungsauslöschungspunkten zum Gerinne sein, damit die Rutschungsmasse immer noch geschieberelevant für den Wildbach ist.

Als quantitatives Mass für die Analysen wurde für die Entfernung zum Gerinne die horizontale Distanz [m] vom Rutschungs-Auslösepunkt entlang der Fliessrichtung zum nächstgelegenen Gerinne bestimmt.

6.1.1.5 Mündungswinkel in das Gerinne

Die Längsachse der Rutschung bezüglich der Gerinneachse ist ein bedeutender Faktor für die Mobilisierung des aus dem Hang gelieferten Lockermaterials im Gerinne. Mündet die Rutschung in einem spitzen horizontalen Winkel ähnlich der Gerinneachse in das Gerinne, hat sie bereits eine ähnliche Richtung eingeschlagen und das gelieferte Material wird eher mobilisiert. Je mehr der horizontale Einmündungswinkel von der Gerinneachse abweicht, umso weniger ähnlich ist die Schubrichtung. Dabei kann bei grösseren Lieferungskubaturen innert kurzer Zeit das Gerinne von der Seite her verklaut werden, den Gerinneabfluss kurzzeitig aufstauen und sich daraus nach einem plötzlichen Durchbruch ein Murgang und eine Schwallwelle bilden.

Für den Einmündungswinkel wurde eine Klassierung der Einmündungswinkel vorgenommen. Die drei Klassen wurden folgendermassen definiert (vgl. auch Abb. 6-1):

- Klasse „0°“: Mündungswinkel 0-20°
- Klasse „45°“: Mündungswinkel 20-70°
- Klasse „90°“: Mündungswinkel 70-110°

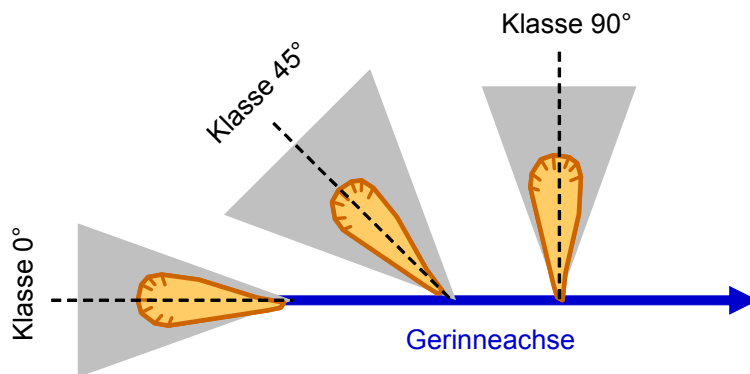


Abb. 6-1: Klassierung der Rutschungs-Einmündungswinkel

6.1.2 Einflussfaktoren im Gerinne

6.1.2.1 Lockermaterialangebot

Ohne das Vorhandensein von mobilisierbarem Lockermaterial ist im Gerinne keine Geschiebemobilisierung möglich. Für die Analysen der Grossereignisse wurden drei Klassen für das Lockermaterialangebot definiert:

- **Fels F:** Gerinneabschnitte im anstehenden, festen Fels (F für Fels), in denen kein mobilisierbares Lockermaterial vorhanden ist.
- **Limitiertes Lockermaterial LML:** Beim limitierten Lockermaterial ist in der Gerinnesohle eine beschränkte Menge mobilisierbares Lockermaterial vorhanden (LML für LockerMaterial Limitiert). Jedoch ist nicht unweit im Untergrund der anstehende Fels. Während Ereignissen herrschen in solchen Gerinneabschnitten oft sedimentlimitierte Verhältnisse. Sedimentlimitierte Abschnitte sind meist in steilen, felsigen Gebieten zu finden, welche von den seitlichen Hängen durch Jungschuttproduktion „genährt“ werden. Aber auch Gerinneabschnitte

mit Querverbau gehören zu dieser Kategorie, falls ein Versagen während einem Ereignis ausgeschlossen werden kann.

- **Unlimitiertes Lockermaterial LMUL:** Hier besteht quasi ein unerschöpfliches Angebot an mobilisierbarem Lockermaterial (LMUL für LockerMaterial UnLimitiert) wie es z.B. in Altschuttgebieten zu finden ist. Da das Lockermaterialangebot hier unlimitiert ist, wird die Menge des mobilisierbaren Geschiebes durch die anderen lokalen Standortfaktoren im Gerinne bestimmt.

6.1.2.2 Einzugsgebietsfläche oberhalb

Eine genügend grosse Abflussmenge ist eine grundlegende Voraussetzung für Geschiebemobilisierung und Geschiebetransport im Gerinne. Für die Analysen der Grossereignisse lagen aber nur in den wenigsten Fällen Informationen zu Abflüssen zur Verfügung. Aus diesem Grund musste ein alternativer Einflussfaktor für den unbekanntem Abfluss während der Ereignisse gefunden werden, der an jedem Ort in einem Wildbach festgelegt werden kann und der zwischen den verschiedenen Wildbächen Vergleiche zulässt. Im Bewusstsein, dass dies aus hydrologischer Sicht eine extreme Vereinfachung ist, wurde als Alternative für den Abfluss jeweils die Einzugsgebietsfläche oberhalb des Gerinneabschnitts als Einflussfaktor berücksichtigt.

Die **Einzugsgebietsfläche (A_{EG}) oberhalb des Gerinneabschnitts** [km^2] ist ein stark generalisiertes quantitatives Mass für die vor und während einem Ereignis beregnete Fläche und dem daraus entstandenen Abfluss.

Bei kleineren Werten kann die Einzugsgebietsfläche limitierend wirken. Im limitierenden Bereich ist die Einzugsgebietsfläche, und somit der Abfluss, zwar genügend gross um Geschiebe zu mobilisieren, jedoch noch so klein, dass er die Menge des mobilisierbaren Lockermaterials sehr einschränkt. Man spricht hier von einer abflusslimitierten Situation. Abflusslimitierte Verhältnisse sind meistens in Talflüssen entscheidend für die Geschiebeprozesse. In Wildbächen sind sie meist in den oberen Teilen der Einzugsgebiete oder auf Flachstrecken massgebend.

6.1.2.3 Gerinneneigung

Die Gerinneneigung ist massgebender Faktor für die Reliefenergie, aus der schlussendlich die Geschwindigkeit und somit die Erosionskraft des Wasser-Geschiebe-Gemisches im Gerinne resultiert.


Das quantitative Mass zur Beschreibung ist die **mittlere Gerinneneigung eines Gerinneabschnitts J_{GA}** in %.

Kleinere Werte führen zu einer limitierten Geschwindigkeit und Schleppkraft, was zu Ablagerungen führen kann. Grosse Werte erfüllen die Disposition zu Erosion.

6.2 Einflussfaktoren des Blickwinkels „Bedingungen oberhalb“

Die Einflussfaktoren des Blickwinkels „Bedingungen oberhalb“ sind in Tab. 6-2 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 6-2: Einflussfaktoren des Blickwinkels „Bedingungen oberhalb“

	<ul style="list-style-type: none"> • Transportprozess oberhalb • Gerinneneigungsänderungen • Lokaler und akkumulierter Energie-Index • Hanginput bis und mit dem zu beurteilenden Gerinneabschnitt • Einmündung von Seitengerinnen
---	---

6.2.1 Transportprozess oberhalb

Ein wichtiger Einflussfaktor ist der Transportprozess, welcher aus dem unmittelbaren Gerinneabschnitt oberhalb kommt. Kommt vom oberliegenden Gerinneabschnitt ein Murgang, und kann dieser aufgrund der lokalen Standortfaktoren weitertransportiert werden, ist mit grösseren Erosionsleistungen zu rechnen als wenn von oben lediglich Geschiebe durch fluvialen Geschiebetrieb kommt.

Auch für die Mobilisierung von seitlichem Geschiebeeintrag durch Hangprozesse ist es entscheidend, ob ein Murgang vorherrscht oder fluvialer Geschiebetrieb, da durch Murgänge deutlich mehr aus dem Hang in das Gerinne geliefertes Lockermaterial mobilisiert werden kann.

Für die Beschreibung des Transportprozesses stehen in dieser Arbeit als qualitatives Mass „**Murgangtransport**“ oder „**fluvialer Geschiebetrieb**“ (vgl. auch Kap. 2.3.4) zur Verfügung.

6.2.2 Gerinneneigungsänderung

Veränderungen der Gerinneneigung haben insbesondere bei Verflachungen einen grossen Einfluss auf die Transportkapazität und können als wichtige Schlüsselstellen während Grossereignissen betrachtet werden (Heim 2005). Die Transportraten nehmen bei abnehmendem Gefälle ab und es kann zu Ablagerungsprozessen kommen.

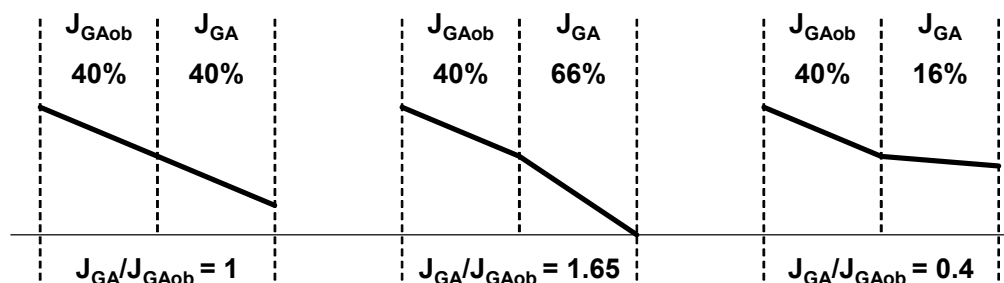


Abb. 6-2: Verhältnis der Gerinneneigung zweier Gerinneabschnitte im Längenprofil betrachtet

Als Mass solcher Reduktionen der Transportkapazität wurde das Verhältnis der Gerinneneigung im Gerinneabschnitt (J_{GA}) zum unmittelbar oberhalb liegenden Gerinneabschnitt (J_{GAob}) gewählt.

Bei gleich bleibendem Gefälle liegt das **Verhältnis J_{GA}/J_{GAob}** bei 1, bei konvexen Bedingungen >1 und bei konkaven Bedingungen bei <1 (vgl. Abb. 6-2). Wenn zwei Gerinne in den Gerinneabschnitt münden wird als J_{GAob} die mittlere Gerinneneigung der beiden einmündenden Gerinne berechnet, ohne eine Gewichtung z.B. aufgrund von deren Länge vorzunehmen.

Die kleinsten Werte des Verhältnisses J_{GA}/J_{GAob} im Bereich von < 0.3 wurden jeweils unterhalb von Wasserfällen beobachtet. Beispiele dafür sind: Schwendibach (3-4), Indrist Weid (8-4), Dongia (42-3, 42-5), Reuses du Dolent (53-3), Dorfbach (54-7).

6.2.3 Lokaler und akkumulierter Energie-Index

Stark vereinfacht ausgedrückt wird in Wildbachsystemen Geschiebe mobilisiert durch die Umwandlung von potenzieller Energie (Reliefenergie) des Wasser-Geschiebegemischs in kinetische Energie (Geschwindigkeit), Reibungsenergie und Wärmeenergie. Die Geschwindigkeit ist hauptverantwortlich für die Geschiebemobilisierung im Gerinne, da durch grössere Geschwindigkeiten die Erosionskraft zunimmt. Während der Erosion von Sohlenmaterial und durch den Transport von Geschiebe werden von der umgewandelten Reliefenergie grössere Anteile zu Lasten der Geschwindigkeit in Reibungsenergie und Wärmeenergie umgewandelt. In steilen, felsigen Gerinneabschnitten, die stark sedimentlimitiert sind und deren Sohle wenig rau ist, ist der Anteil umgewandelter Reliefenergie in Geschwindigkeit anstelle von Reibungs- und Wärmeenergie vergleichbar grösser. Dieser Effekt ist vergleichbar mit einer glatten Rutschbahn, auf der es sich schneller hinunter rutschen lässt als auf einer gleich geneigten, aber rauhen Fläche, beispielsweise einem Grashang. Dies führt dazu, dass sich in steilen felsigen Gerinneabschnitten hohe Geschwindigkeiten aufbauen können und unterhalb solcher Gerinneabschnitte grosse kinetische Energie verfügbar ist, um Gerinneerosion zu verursachen. Ähnlich, aber in stark verringertem Mass verhält es sich nach Ablagerungsstrecken. Hier wird Geschiebe liegen gelassen und dadurch die Reibungsverluste zu Gunsten der Geschwindigkeit verringert.

Als stark vereinfachtes Mass für diese „kinetische Energie aufbauenden“ Verhältnisse wurde der **lokale Energie-Index $E-I_{GA}$** entwickelt. In steilen, sedimentlimitierten Gerinneabschnitten, wo sich grosse Geschwindigkeiten aufbauen können, ist der lokale Energie-Index $E-I_{GA}$ positiv, in Erosionsabschnitten im unlimitierten Lockermaterial, wo grössere Anteile in Reibung und Wärmeenergie anstatt in kinetische Energie umgewandelt werden, ist er negativ.

In Erosions- und Transitstrecken wird der lokale Energie-Index $E-I_{GA}$ anhand der mittleren Gerinneneigung und der schiefen Länge sowie einem Gewichtungsfaktor aufgrund des Lockermaterialangebots berechnet (vgl. Berechnungsformeln in Tab. 6-3). Dieser Gewichtungsfaktor ist positiv und 1 in reinen Felsstrecken ohne Lockermaterialangebot (extrem sedimentlimitiert). Bei Gerinneabschnitten im limitierten Lockermaterial (sedimentlimitiert) ist er positiv und hat im Vergleich zu reinen Felsstrecken ein kleineres Gewicht, nämlich 0.75. In Gerinneabschnitten mit einem unlimitierten Lockermaterialangebot ist der Faktor -1, was das Gegenstück zu Gerinneabschnitten im reinen Fels bedeutet.

In Ablagerungsstrecken wird der lokale Energie-Index $E-I_{GA}$ anhand von drei Parametern berechnet (vgl. Berechnungsformel in Tab. 6-3). Das Verhältnis der Ablagerungskubatur (GF_A) an der Gesamtfracht (GF_{ob}) ist ein Mass für die nach den Ablagerungen wieder frei verfügbaren Transportkapazität. Die Einzugsgebietsfläche oberhalb gibt einen groben Anhaltspunkt für die Abflussmenge im Gerinneabschnitt. Der Faktor 10 am Ende der Berechnungsformel dient einer Anhebung des lokalen Energie-Index $E-I_{GA}$ auf das Niveau der lokalen Energie-Indizes $E-I_{GA}$ der Erosionsstrecken.

Tab. 6-3: Berechnungsformeln für den lokalen Energie-Index $E-I_{GA}$

Gerinneabschnitt	Berechnungsformel für lokalen Energie-Index $E-I_{GA}$
Felsstrecken, Transitstrecken	$E-I_{GA} = J_{GA} \cdot I_s / 1000 \cdot 1$
Erosionsstrecken im limitierten Lockermaterial	$E-I_{GA} = J_{GA} \cdot I_s / 1000 \cdot 0.75$
Erosionsstrecken im unlimitierten Lockermaterial	$E-I_{GA} = J_{GA} \cdot I_s / 1000 \cdot -1$
Ablagerungsstrecken	$E-I_{GA} = GF_A / GF_{ob} \cdot A_{EG} \cdot 10$
	J_{GA} : Gerinneneigung im Gerinneabschnitt [%] I_s : schiefe Länge des Gerinneabschnitts [m] GF_A : abgelagerte Geschiebefracht im GA [m ³] GF_{ob} : Geschiebefracht beim Eintritt in GA [m ³] A_{EG} : Einzugsgebietsfläche oberhalb GA [km ²]

Entscheidend für den Blickwinkel „Bedingungen oberhalb“ ist nun die Aufsummierung der lokalen Energie-Indizes $E-I_{GA}$ der oberhalb liegenden Gerinneabschnitte dem Gerinne entlang bis zum Eintreffen in den zu beurteilenden Gerinneabschnitt. Das Mass für diese Aufsummierung ist der **akkumulierte Energie-Index $E-I_{akk}$** . Je grösser der Wert des akkumulierten Energie-Index $E-I_{akk}$ wird, umso grösser ist die Geschwindigkeit in einem Gerinneabschnitt und durch das limitierte Lockermaterialangebot auch die freie Transportkapazität. Je kleiner der Wert des $E-I_{akk}$ ist, umso stärker ausgelastet ist die Transportkapazität und umso langsamer die Geschwindigkeit.

Bei dieser Aufsummierung muss beachtet werden, dass der Wert des akkumulierten Energie-Index $E-I_{akk}$ nie negativ werden darf, sondern, sobald er unter null sinkt, auf null gesetzt werden muss. Die Regeln zur Berechnung werden in der Folge aufgelistet und können als Beispiel zur Veranschaulichung in Abb. 6-3 nachvollzogen werden.

- Der akkumulierte Energie-Index $E-I_{akk}$ bei Erstabschnitten ist immer 0, da oberhalb gar keine Gerinneabschnitte liegen (A in Abb. 6-3)
- Der $E-I_{akk}$ beim ersten Unterlieger-Abschnitt unterhalb eines Erstabschnitts ist 0, wenn der $E-I_{GA}$ des oberhalb liegende Erstabschnitts negativ ist, resp. im unlimitierten Lockermaterial liegt (B). Wenn der oberhalb liegende Erstabschnitt einen $E-I_{GA} > 0$ hat (limitiertes Lockermaterial oder keines), erhält sein Unterlieger-Abschnitt als $E-I_{akk}$ den positiven $E-I_{GA}$ Wert des Erstabschnitts oberhalb (C), da dadurch viel kinetische Energie zur Verfügung steht.
- Danach wird pro Unterlieger-Abschnitt immer der $E-I_{akk}$ oberhalb des Abschnitts mit dem $E-I_{GA}$ des Gerinneabschnitts addiert und als $E-I_{akk}$ an den unterhalb liegenden Gerinneabschnitt weitergegeben. Wenn diese Summe > 0 ist (freie kinetische Energie steht zur Verfügung), wird dieser positive Wert direkt weitergegeben (D). Wenn die Summe < 0 ist (keine zusätzliche freie kinetische Energie), wird der $E-I_{akk}$ für den nächsten Gerinneabschnitt wieder auf 0 gesetzt (E). Dieses Vorgehen ergibt sich aus dem Prozessverständnis. Die „aufgebaute kinetische Energie“ z.B. nach einer Felsstrecke (positiver $E-I_{GA}$) ergibt einen positiven akkumulierten Energie-Index $E-I_{akk}$. Beim Eintreffen in eine lange Erosionsstrecke im unlimitierten Lockermaterial ($E-I_{GA}$ negativ) wird dieser positive akkumulierte Energie-Index $E-I_{akk}$ sozusagen aufgebraucht, was zu verstärkter Erosion führt. Dabei kann nur soviel aufgebaute kinetische Energie aufgebraucht werden, wie aus den oberen Gerinneabschnitten verfügbar ist. Aus diesem Grund kann der akkumulierte Energie-Index

$E-I_{akk}$ nicht unter null gehen. Somit liegen die Werte des akkumulierten Energie-Index $E-I_{akk}$ zwischen null, wenn keine kinetische Energie aufgebaut wird, und grösser null, wenn kinetische Energie aufgebaut wird.

- Münden zwei oder mehrere Gerinne in einen Unterlieger, werden die positiven $E-I_{akk}$ der einzelnen Zuliefergerinne aufsummiert (F), die negativen auf null gesetzt (G).

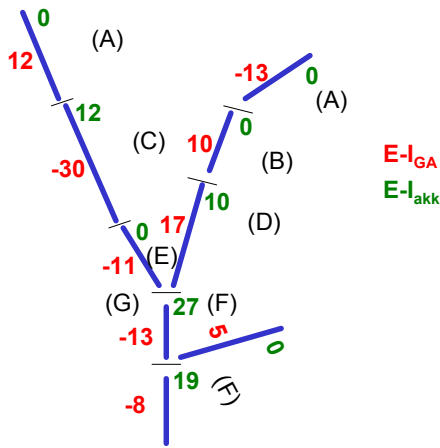


Abb. 6-3: Schematisches Beispiel zur Berechnung der akkumulierten Energie –Index $E-I_{akk}$

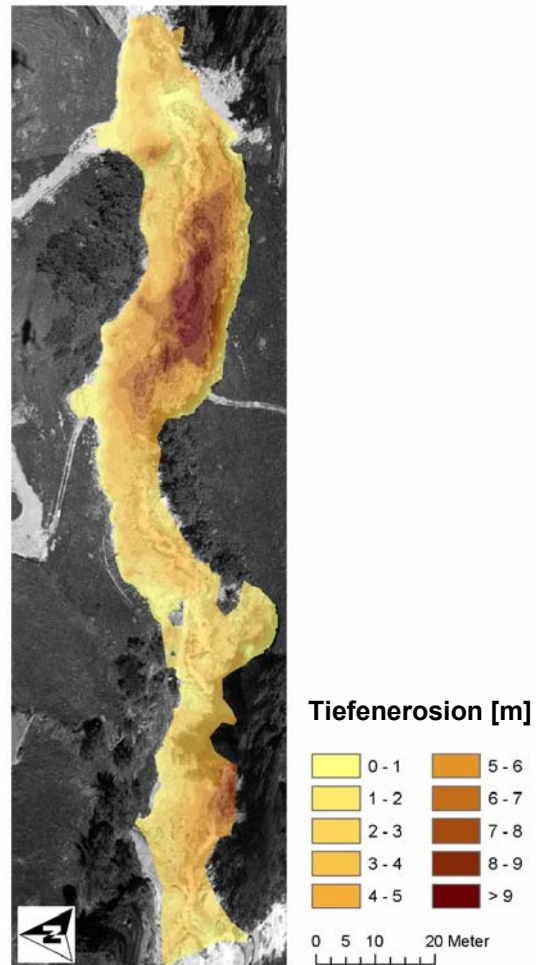


Abb. 6-4: Blick vom Gegenhang (links) und Volumenbilanz im Rote Bach (6-9/6-10) mittels Fotogrammetrie (Zingg 2007)

Besonders hohe $E-I_{akk}$ Werte werden in steilen felsigen Einzugsgebieten aufgebaut. Treffen hohe Abflüsse und Murgänge danach unterhalb des Wandfusses zum ersten Mal in Gerinneabschnitte mit unlimitiertem Lockermaterialangebot, kann dies zu verhältnismässig grossen Erosionsleistungen führen. Dieses Phänomen wurde beispielsweise in den Gerinneabschnitten der Wildbäche Rote Bach (6-9), Indrist Weid (8-4), Fallbach (10-5), Meisibach (30-8), Dorfbach Sachseln (36-7), Dongia (42-14), Nant du Pissot (51-7) und Dorfbach Mörel (54-7) beobachtet.

Im Roten Bach (6) hatte der $E-I_{akk}$ beim Eintreffen in Gerinneabschnitt 9 einen Wert von knapp 60. In den Gerinneabschnitten 9 und 10 wurde mittels Fotogrammetrie eine Volumenbilanzierung erstellt (Zingg 2007) (vgl. Abb. 6-4). Die mittlere Erosionsleistung wurde auf rund $80 \text{ m}^3/\text{m}$ quantifiziert. Verstärkt wurde diese jedoch noch durch einen erhöhten Abfluss beim Ausbruch einer Flutwelle aus dem Hubelgletscher.

6.2.4 Hanginput bis und mit dem zu beurteilenden Gerinneabschnitt

Die Menge an geliefertem Material aus dem Hang zusammen mit dem Hanginput im betrachteten Gerinneabschnitt selbst ist ebenfalls ein wichtiger Faktor. Grosse Mengen an Geschiebeinput aus dem Hang und hier insbesondere durch Rutschungsprozesse, können dazu führen, dass die Bedingungen im Mündungsbereich dieser Rutschungen von sedimentlimitiert zu eher abflusslimitiert wechseln, indem ein unerschöpfliches Geschiebepotenzial im Gerinne vorhanden ist. Dadurch wird die Transportkapazität an diesen Stellen ausgelastet. Sobald nun in unterhalb liegenden Gerinneabschnitten z.B. durch eine Verflachung die Bedingungen verändert werden, kann es durch die abflusslimitierten Verhältnisse zu früheren Ablagerungstendenzen kommen als dies ohne Hanginput bei eher sedimentlimitierten Verhältnissen möglich wäre. Dieses Phänomen wurde zum Beispiel im Schwarzbächli (5-2), Flibach (38-2, 38-3) und Rio de Tennasses (50-1) beobachtet.

Als quantitatives Mass für den **Hanginput $[\text{m}^3]$ oberhalb** werden sämtliche vom Hang in das Gerinne gelieferten Volumina bis und mit dem betreffenden Gerinneabschnitt aufsummiert.

6.2.5 Einmündung von Seitengerinnen

Münden zwei Gerinne ineinander, kommt es im Gerinneabschnitt unterhalb zu einem erhöhten Abflussangebot, was bei unlimitiertem Lockermaterialangebot zu erhöhten Erosionsleistungen führen kann. Je weiter unten im Einzugsgebiet diese Einmündungen sind, umso grösser kann ihr Einfluss werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Teileinzugsgebiete der einzelnen Gerinne ähnlich gross sind und eine ähnliche Form haben, weil dadurch die Abflussspitzen während einem Grossereignis ungefähr gleichzeitig erfolgen. Beobachtet wurde dieser Effekt in den Wildbächen Schwendibach (3-5), Riggisalpbach (16-9), Mehlbach (31-9), Melbach (33-5), Foribach (35-7) und Holdenbach (45-9).

Als Mass für die Einmündung von Seitengerinnen wurde die Anzahl Gerinne, die in einen Gerinneabschnitt münden, verwendet.



Abb. 6-5: Mündung zweier Gerinne im Holdenbach und anschliessende verstärkte Erosion im Folgeabschnitt (45-9)

6.3 Einflussfaktoren des Blickwinkels „Negativfaktoren“



Negativfaktoren sind spezielle Konstellationen oder Prozesse, welche meistens zur Auslösung von Murgängen führen. Sie können sowohl in den Gerinneabschnitten, in denen sie ihren Ursprung haben (= direkte Beeinflussung eines Gerinneabschnitts), als auch in unterhalb liegenden Gerinneabschnitten (= indirekte Beeinflussung eines Gerinneabschnitts) zu extremen Erosionsleistungen führen. Negativfaktoren wirken als Schwellenprozess im gesamten Wildbachsystem und die mobilisierten Geschiebefrachten können dadurch um ein Vielfaches erhöht werden als dies ohne Negativfaktoren der Fall wäre.

In dieser Arbeit wurden insgesamt 8 verschiedene Negativfaktoren definiert und in 20 der 58 Analysebächen beobachtet. Sie lassen sich in je vier sog. „Geschiebebeeinflussende Negativfaktoren“ und „Abflussbeeinflussende Negativfaktoren“ einteilen (vgl. Kap. 6.3.1 und 6.3.2) und sind in Abb. 6-6 überblicksmässig vorgestellt. Diese Aufstellung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es ist durchaus möglich, dass bei Analysen weiterer kommender Grossereignisse zusätzliche Negativfaktoren definiert werden könnten. Die hier vorgestellten 8 Negativfaktoren sind das Abbild der 58 analysierten Grossereignisse in der Stichprobe der Analysebäche.

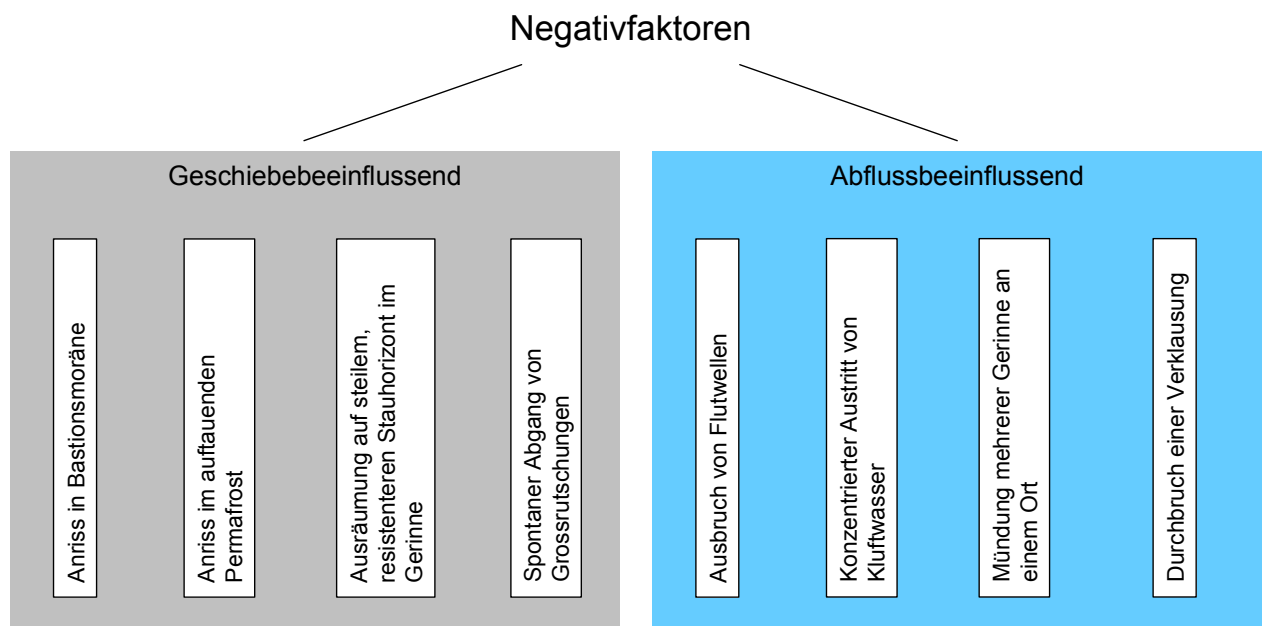



Abb. 6-6: Überblick über die Geschiebe- und Abflussbeeinflussenden Negativfaktoren


6.3.1 Geschiebebeeinflussende Negativfaktoren

Geschiebebeeinflussende Negativfaktoren sind dadurch gekennzeichnet, dass sich auf kleinem Raum im Hang oder Gerinne eine sehr grosse Geschiebekubatur in Bewegung setzt und daraus ein Murgang ausgelöst wird. Voraussetzung für diese Mobilisierung ist ein steiler Stauhorizont aus Fels, Eis oder Lockermaterial, der mit einer Auflage einer mächtigen Lockermaterialschicht versehen ist. Die Auslösung kann einerseits durch eine Übersättigung der Lockermaterial-Auflage und andererseits durch Sickerströmungen zwischen der Stauschicht und der Lockermaterial-Auflage oder durch eine Kombination davon erfolgen. Die folgenden 4 geschiebebeeinflussenden Negativfaktoren wurden definiert (vgl. Tab. 6-4 bis Tab. 6-7).

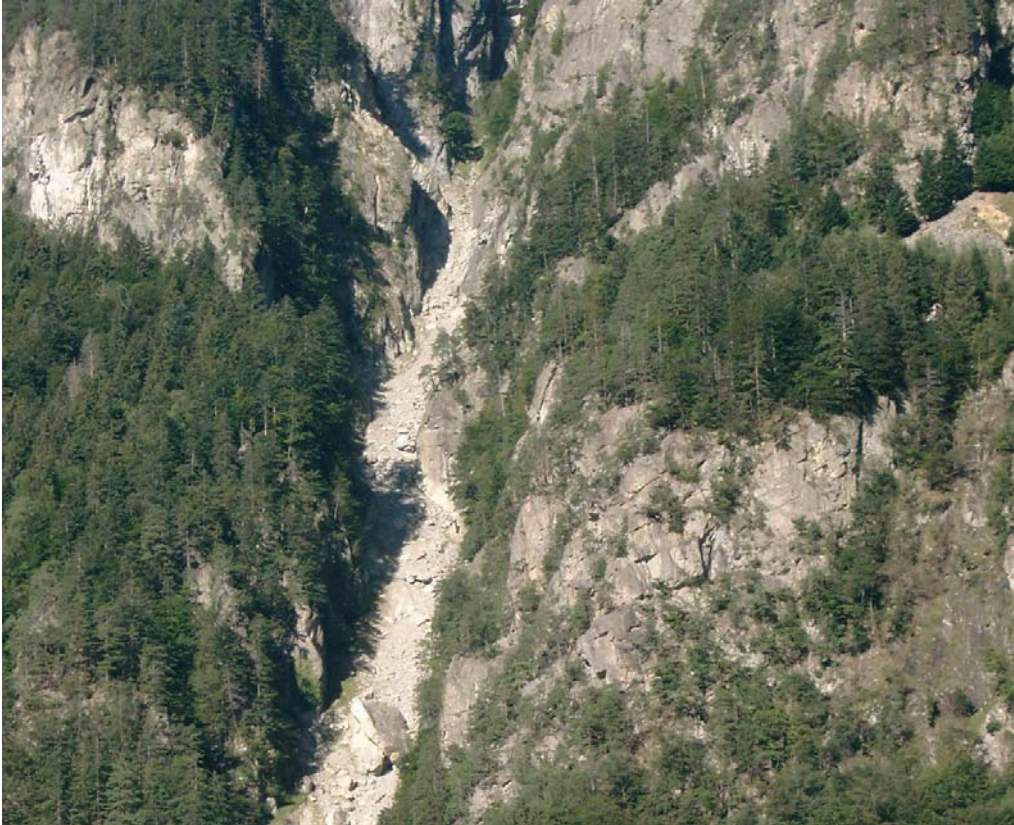
Tab. 6-4: Negativfaktor „Bastionsmoräne“

Anriss in Bastionsmoräne	BM
	
<p>Abb. 6-7: Murganganriss in der Bastionsmoräne im Rotlauibach (4-3) (Foto: Flotron AG)</p>	
<p>Prozess Murgangauslösung an der Front einer steilen Bastionsmoräne: Bei der Mobilisierung findet in der wassergesättigten Moränenauf- lage eine Sohlenverflüssigung bis auf den Stauhorizont aus Eis oder Lockermaterial statt, aufgrund der Steilheit evtl. in der Initi- alphase kombiniert mit Rutschprozessen entlang des Stauhorizonts. Weiterführende Informationen zu Murganganrissen in Basti- onsmoränen sind auch in Fässler (2008) ersichtlich.</p>	
<p>Voraussetzungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gletschervorfeld im unlimitierten Lockermaterialangebot • Vorhandensein einer steilen Bastionsmoräne • Steiler Stauhorizont aus Toteis, Permafrost oder verfestigtem Lockermaterial im Moränenkörper • Mächtige Moränenauf- lage auf diesem Stauhorizont 	
<p>Auslösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • nach langanhaltenden, intensiven Niederschlägen • in der Regel beschränkt auf die Monate August bis September, während verstärkter Gletscherschmelze 	
<p>Beispiele Der Negativfaktor „Bastionsmoräne“ (BM) wurde bei den Grossereignissen der Analysebäche Rotlauibach (4-3) und Reuses du Dolent (53-1) sowie beim Ereignis-Validierungsbach Val Fless (65-1) beobachtet.</p>	


Tab. 6-5: Negativfaktor „Permafrost“

Anriss im auftauenden Permafrost	PF
	
<p>Abb. 6-8: Murganganriss im Permafrostgebiet im Gebiet Ribenen unterhalb des Rienzenstocks (UR) (Foto: Geotest AG und belop gmbh)</p>	
<p>Prozess Murgangauslösung in der aktiven Auftauschicht eines Permafrostgebiets: Bei der Mobilisierung handelt es sich um eine Sohlenverflüssigung der wassergesättigten Auftauschicht des Permafrosts auf dem Stauhizont am Grenzbereich zum gefrorenen Untergrund, evtl. kombiniert mit Rutschprozessen entlang des Stauhizonts. Weiterführende Informationen zu Murganganrissen in Permafrostgebieten sind auch in Fässler (2008) ersichtlich.</p>	
<p>Voraussetzungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • steile Blockschutthalde im Permafrostgebiet mit aktiver Auftauschicht • Anschluss an ein Gerinne 	
<p>Auslösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • langanhaltende intensive Niederschläge • in der Regel beschränkt auf die Monate August und September, in denen die aktive Auftauschicht am grössten ist. 	
<p>Beispiele Der Negativfaktor „Permafrost“ (PF) wurde beim Analysebach Ritigraben (58) untersucht.</p>	

Tab. 6-6: Negativfaktor „Ausräumung auf steilem, resistenteren Stauhizont im Gerinne“

Ausräumung auf steilem, resistenteren Stauhizont im Gerinne	AS
	
<p>Abb. 6-9: Mit Lockermaterial gefülltes Felscouloir im Tüfeltaal (48-3)</p>	
<p>Prozess Murgangbildung durch Ausräumung einer mächtigen locker gelagerten Lockermaterialschicht auf einem steilen, resistenteren Stauhizont aus anstehendem Fels oder Lockermaterial im Gerinne. Als Mobilisierungsprozess kommen verschiedene Mechanismen in Frage. Sohlenverflüssigung der Lockermaterialauflage und progressive Erosion an der Oberfläche, aber auch ein Versickern des Wassers in den Lockermaterialkörper und Wiederaustrreten am unteren Ende des Felscouloirs mit Murgangbildung durch rückschreitende Erosion. Wahrscheinlich wird bei der Auslösung der ganze Prozess durch kleinere Gleitprozesse entlang der Stauschicht unterstützt.</p>	
<p>Voraussetzungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • mehrere Meter breites, steiles (>60%) Felscouloir, gefüllt mit einer mächtigen Lockermaterialschicht (Moräne/Jungschutt) oder • mehrere Meter breites, steiles Gerinne (>60%) im unlimitierten Lockermaterial mit undurchlässigerer Schicht im Untergrund (z.B. aus verfestigtem Moränenmaterial) als die darauf liegende Lockermaterialauflage des Sohlenmaterials. 	
<p>Auslösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • langanhaltende intensiven Niederschlägen (evtl. kombiniert mit intensiver Schneeschmelze) • oder bei Gewitter bei einer grossen Vorfeuchte (evtl. kombiniert mit intensiver Schneeschmelze) 	
<p>Beispiele Der Negativfaktor „Ausräumung auf Stauhizont“ (AS) wurde bei den Grossereignissen der Analysebäche Minstigerbach (55-1) und Tüfeltaal (48-3) in Form des Felscouloirs beobachtet, in der Plaunca (24-1) aufgrund undurchlässiger Moränenschichten beobachtet und im Saxé (51-1) ebenfalls so vermutet.</p>	


Tab. 6-7: Negativfaktor „Grossrutschung“

Spontaner Abgang einer Grossrutschung	GR
	
<p>Abb. 6-10: Grossrutschung im Gangbach (49-1)</p>	
<p>Prozess</p> <p>Murgangbildung durch einen spontanen Abgang einer Hangrutschung mit einem Volumen $> 20'000 \text{ m}^3$: Die Mobilisierung im Hang erfolgt durch eine Übersättigung des Lockermaterialkörpers und damit einer Absenkung der Scherfestigkeit. Die Bewegung erfolgt entlang der Gleitfläche in das Gerinne, wo verschiedene Mechanismen stattfinden können. Bei Einmündungswinkeln (vgl. Abb. 6-1) der Klasse „0°“ fließen die Murgänge meist in mehreren Schüben aus der Rutschungsmasse heraus direkt im Gerinne als Murgang weiter. Je nach Grösse des Rutschungsvolumens und der Bedingungen im Gerinne, kann es bei Grossrutschungen mit Einmündungswinkeln der Klassen „45°“ und „90°“ zu einer Blockierung des Gerinnequerschnitts und daraufhin zu einem Übergang zum Negativfaktor „Verklauserung“ (VK) kommen.</p>	
<p>Voraussetzungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hänge mit einer Neigung zwischen 20° und 45° mit Anschluss an ein Gerinne • Mächtige Lockermaterialschicht auf einer deutlich ausgebildeten Gleitfläche auf anstehendem Fels oder im Lockermaterial 	
<p>Auslösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nach langanhaltenden, intensiven Niederschlägen • Meist wird die Auslösung unterstützt durch eine grosse Vorfeuchte und/oder starker Schneeschmelze 	
<p>Beispiele</p> <p>Der Negativfaktor „Grossrutschung“ (GR) ist der einzige Negativfaktor im Hang und wurde in den Grossereignissen der Analyse-bäche Glyssibach (1-1), Schwarzbächli (5-1), Haldibach (29-2), Acherlibach (34-2), Flibach (38-1) und Gangbach (49-1) beobachtet.</p>	


6.3.2 Abflussbeeinflussende Negativfaktoren

Abflussbeeinflussende Negativfaktoren zeichnen sich aus durch einen räumlich und/oder zeitlich stark konzentrierten Extremabfluss, der durch verschiedene Ursachen entstehen kann: Spezielle Gerinnenetzgeometrie, Ausbrüche von Flutwellen oder temporär gestautem Wasser oder einem Abflussinput von ausserhalb der Systemgrenze durch unterirdische Fließwege. Die dabei definierten 4 Negativfaktoren sind in Tab. 6-8 bis Tab. 6-11 ersichtlich:


Tab. 6-8: Negativfaktor „Flutwelle“

Ausbruch von Flutwellen	FW
	
<p>Abb. 6-11: Blick in das Hohlraumsystems des subglazialen Sees im Rote Bach (6-1) (Foto: S. Zingg)</p>	
<p>Prozess</p> <p>Spontaner, nicht an ein Niederschlagsereignis gebundener Ausbruch von oberirdisch oder unterirdisch gestautem Wasser und dadurch Bildung einer Flutwelle: Aufgrund des räumlich und zeitlich stark konzentrierten Abflusses Murgangbildung möglich, aber nicht zwingend. Dabei erfolgt die Murgangbildung nicht zwingend im Gerinneabschnitt, in dem die Flutwelle ausbricht, sondern unter Umständen erst im ersten Unterlieger-Abschnitt, der die Bedingungen zur Bildung eines Murgangs erfüllt. Der Mobilisierungsmechanismus ist in den meisten Fällen Sohlenverflüssigung aufgrund der enormen Abflussspitze in sehr kurzer Zeit. Im Vergleich zu niederschlagsbedingten Murgängen laufen diese Murgänge meist in einem einzelnen Murschub ab. Weiterführende Informationen zu Flutwellen in glazialen Wildbacheinzugsgebieten sind auch in Fässler (2008) ersichtlich.</p>	
<p>Voraussetzungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorhandensein eines oberirdischen Sees, dessen Dämme z. B. durch auftauenden Permafrost instabil werden und brechen oder dessen Ausfluss durch Lawinschnee oder Eis, in seltenen Fällen auch Holz verstopft ist und plötzlich durchbricht. • Vorhandensein von anderen Aufstauungen von Wasser, z. B. in Gletschern in Form von Wassertaschen, subglazialen Seen oder am Wandfuss von Felswänden durch Lawinschnee oder Eis, welche aufgrund des Schmelzens des Eises/Schnees oder aufgrund des grossen hydraulischen Drucks plötzlich brechen. 	
<p>Auslösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • niederschlagsunabhängig • erfolgt durch einen plötzlichen Bruch der die Wassermassen rückhaltenden Dämme, des Eises oder Schnees. 	
<p>Beispiele</p> <p>Der Negativfaktor „Flutwelle“ (FW) wurde bei folgenden Grossereignissen beobachtet: Analysebäche: Rote Bach (6-1), Vadret da l'Alp Ota (21-1). Ereignis-Validierungsbäche: Minstigerbach (77-1)</p>	


Tab. 6-9: Negativfaktor „Kluftwasser“

Konzentrierter Austritt von Kluftwasser	KW
	
<p>Abb. 6-12: Konzentrierter Austritt von Kluftwasser aus der Löcherfluh im Dürnbach (70) (Foto: Kantonspolizei Obwalden)</p>	
<p>Prozess</p> <p>Bei langanhaltenden intensiven Niederschlägen können sich die Speicher in komplexen Kluftsystemen stark auffüllen, was temporär zu veränderten unterirdischen Wasserläufen und an der Oberfläche zu konzentrierten Kluftwasseraustritten führen kann. Diese Austritte sind theoretisch betrachtet ein Abflussinput von ausserhalb der in Kap. 5.2 definierten Systemgrenze der Einzugsgebietsfläche und bilden sowohl lokal an der Austrittsstelle als auch im gesamten System einen zusätzlichen Abflussinput. Die Mobilisierung von Geschiebe und allenfalls Bildung eines Murgangs erfolgt meist nicht direkt in den Gerinneabschnitten, in denen das Kluftwasser konzentriert austritt. Diese Austritte liegen häufig oberhalb von Felsbändern, welche als Stauhorizont dienen, und unmittelbar dort ist meist kein mobilisierbares Lockermaterial vorhanden. Die Murgangbildung erfolgt dann erst im nächsten Unterlieger-Abschnitt, welcher aufgrund seiner lokalen Standortfaktoren die Bedingungen für eine Murgangauslösung erfüllt.</p>	
<p>Voraussetzungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bekannte Kluftwasseraustritte von früheren Ereignissen 	
<p>Auslösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nach langanhaltenden intensiven Niederschlägen 	
<p>Beispiele</p> <p>Der Negativfaktor „Kluftwasser“ (KW) wurde verschieden stark ausgeprägt in den Analyseebächen Lauigraben (27-1), Fangtobel (32-1) und Foribach (35-1 und 35-5) beobachtet. Stark ausgeprägt war dieses Phänomen in den Ereignis-Validierungsbächen Dürnbach (70-10) und Firnerengraben (71-1).</p>	

Tab. 6-10: Negativfaktor „Mündung mehrerer Gerinne“

Mündung mehrerer Gerinne an einem Ort	3HG
	
<p>Abb. 6-13: Murgangbildung und Stufe (16 m) nach Einmündung mehrere Gerinne im Rotlauibach (4-4) (Foto: Flotron AG)</p>	
<p>Prozess</p> <p>Eine spezielle Konstellation aufgrund des Gewässernetzes ist gegeben, wenn an einem Punkt mehrere (>2) Gerinne zu einem eigentlichen Hauptgerinne zusammen fließen. Dabei kommt es lokal zu einer plötzlichen Vervielfachung des Abflusses, was im unlimitierten Lockermaterial zur Bildung eines grossen Murgangs führen kann. Die Murgangauslösung und Mobilisierung erfolgt direkt an der Stelle, wo die Gerinne einmünden durch Sohlenverflüssigung. Durch den plötzlich viel höheren Abfluss kann sich nach der Murgangbildung zwischen den einzelnen Zubringergerinnen und dem vereinigten Hauptgerinne eine Stufe bilden. Diese kann durch rückschreitende Erosion im unlimitierten Lockermaterial nach oben verschoben werden und am Fuss der Stufe kann Kolkererosion erfolgen.</p>	
<p>Voraussetzungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gerinnenetz mit der gemeinsamen Mündung von mehr als 2 Gerinnen an einem Ort und im unlimitierten Lockermaterial • je ähnlicher in Grösse und Form die Einzugsgebiete der einzelnen Gerinne sind und je grösser diese Teileinzugsgebiete sind, umso stärker kann sich dieses Phänomen auswirken 	
<p>Auslösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • sowohl bei Gewitter als auch bei langanhaltenden, intensiven Niederschlägen möglich 	
<p>Beispiele</p> <p>Der Negativfaktor „Mehrere Mündungen“ (3HG) wurde in 2 Analyseebächen beobachtet: Rotlauibach (4-4) und Val Valdun (23-5).</p>	

Tab. 6-11: Negativfaktor „Verklausiong“

Durchbruch einer Verkläusung	VK
	
<p>Abb. 6-14: Durchgebrochene Verkläusung verursacht durch eine Grossrutschung im Haldibach (29)</p>	
<p>Prozess</p> <p>Wenn das Gerinne während einem Ereignis durch eine Verkläusung aus Schnee, Eis, Holz oder Lockermaterial blockiert ist, stauen sich die Wassermassen hinter dieser Blockierung auf und es erfolgt ein hydraulischer Druckaufbau. Ist dieser Druck zu gross, kann ein plötzlicher Durchbruch der Verkläusung erfolgen. Beim plötzlichen Durchbruch wird durch den Schwall der ausbrechenden Flutwelle einerseits die Blockierung, andererseits auch Sohlenmaterial aus dem Gerinne mobilisiert und kann als Murgang weiterfliessen.</p>	
<p>Voraussetzungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Blockierung des Gerinnes während einem Hochwasserereignis • Vorhandensein eines grösseren Rückstauraumes im Gerinne 	
<p>Auslösung</p> <ul style="list-style-type: none"> • sowohl bei Gewitter als auch bei langanhaltenden, intensiven Niederschlägen möglich 	
<p>Beispiele</p> <p>Der Negativfaktor „Verkläusung“ (VK) wurde bei folgenden Grossereignissen beobachtet: Analysebäche: Val Varuna (22-1), Haldibach (29-1), Gangbach (49-1), Rio de Tennasses (50-1).</p>	

6.4 Kombination aller Einflussfaktoren

In Kap. 6.1 bis Kap. 6.3 wurden die Einflussfaktoren der verschiedenen Blickwinkel einzeln vorgestellt. Wildbachsysteme sind jedoch komplex und die Einflussfaktoren aller zu berücksichtigenden Blickwinkel können nur in ihrer Kombination und in ihrem komplexen Zusammenspiel betrachtet werden. Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Daten zu den Grossereignissen beinhalten denn auch das Ergebnis dieser Einflussfaktor-Kombinationen und lassen sich nicht auf einzelne Einflussfaktoren reduzieren.

Kap. 7 bis 9 sollen deshalb Ergebnisse zum Prozessverständnis liefern, indem die Kombinationen der einzelnen zu berücksichtigenden Einflussfaktoren der verschiedenen Beurteilungsblickwinkel berücksichtigt werden. Dabei werden die Erkenntnisse anhand der in Kap 2.3 vorgestellten Geschiebeprozesse im Wildbachsystem dargelegt.

7 Geschiebelieferung vom Hang in das Gerinne

Bei der Beurteilung des Geschiebepotenzials in einem Wildbach stellt sich für Praktiker in ihrer täglichen Arbeit unter anderem die Frage, wie viel Lockermaterial von wo aus dem Hang, während einem Ereignis oder auch in der Zwischenzeit, durch welche Prozesse in das Gerinne geliefert werden kann und welche Anteile davon relevant für die Geschiebefracht im Wildbach werden. Kap. 7 soll auf diese Fragen Antworten geben und die bei den Datenanalysen gewonnenen Erkenntnisse zur Geschiebelieferung vom Hang in das Gerinne aufzeigen.

Im vereinfachten Prozesssystem Wildbach liegt der Fokus auf den Lieferungsprozessen durch fluviale Erosion sowie Rutsch- und Fließprozessen (vgl. Abb. 7-1, weisser Kasten).

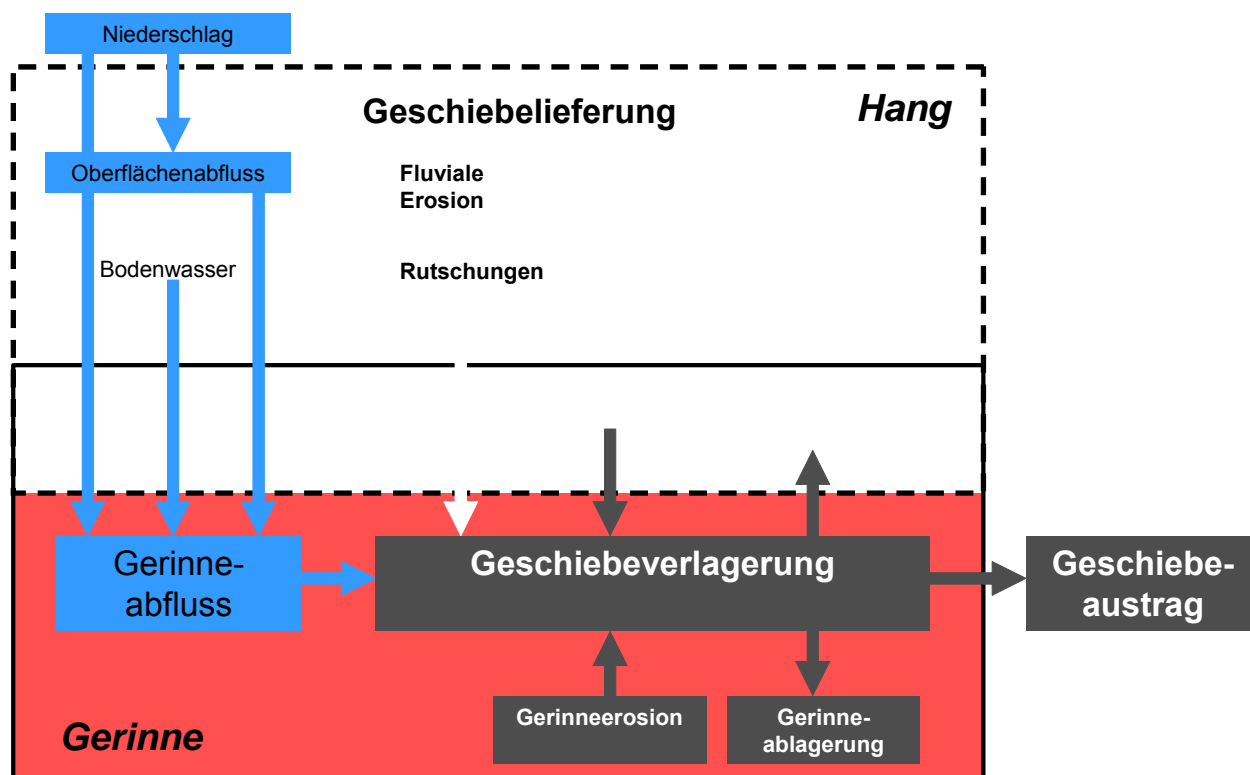


Abb. 7-1: Vereinfachtes Prozesssystem Wildbach mit Fokus auf die Geschiebelieferung aus dem Hang (verändert nach Liener 2000)

Der Blickwinkel bei der Betrachtung von Hangprozessen beschränkt sich auf die lokalen Standortfaktoren im Hang (vgl. Kap. 6.1.1) sowie auf den einzigen Negativfaktor im Hang, die Aktivierung von Grossrutschungen (GR) (vgl. Kap. 6.3.1).

7.1 Fluviale Erosion



Abb. 7-2: Runsenerosion: links: Ri di Bedretto (40-6); rechts: Alpenbach (18-3)

Fluviale Erosion und hier insbesondere Runsenerosion wurde nur in die Datenbank aufgenommen und dokumentiert, wenn die Erosionsleistung in den einzelnen Runsen mindestens $1 \text{ m}^3/\text{m}$ betrug. Solche minimalen Erosionsleistungen wurden in folgenden Gerinneabschnitten beobachtet (vgl. Tab. 7-1):

Tab. 7-1: Beobachtete Erosionsleistungen durch Runsenerosion

Wildbach / Gerinneabschnitt	Erosionsleistung durch Runsenerosion [m^3/m]
Rotlauibach (4-2)	1
Chummerbach (17-1)	1
Chummerbach (17-4)	5-7
Alpenbach (18-3)	3-4
Val da Dusch (20-1)	1
Ri di Bedretto (40-4)	1
Ri di Bedretto (40-6)	2-4
Dongia (42-2)	1
Dongia (42-3)	1
Dongia (42-6)	1
Ri di Ronco (43-10)	2

Die pro Steilrunse gelieferte Kubaturen waren immer $< 1000 \text{ m}^3$. In allen Fällen wurde die gesamte Kubatur der seitlichen Runsen ohne Ablagerungen im Hauptgerinne weiterverlagert.

Bei einigen Grossereignissen wurden zudem Hangmuren durch Felsrunsen als Transitstrecken in das Gerinne geliefert, so zum Beispiel im Milibach (14-1), Edisriederbach (37-2), La Guasta (41-1) oder im Holdenbach (45-1, 45-4). Da sich diese Runsen aber im Fels befanden, konnte keine Erosion erfolgen.

7.2 Rutschungsprozesse

Bei der Beurteilung von Rutschungsprozessen interessieren für die Praxis vor allem:

- die Bedingungen an den Auslösepunkten von Rutschungen
- die gelieferten Volumina
- sowie ob diese gelieferten Kubaturen im Gerinne weiterverlagert werden können oder allenfalls zwischendeponiert werden oder sogar zu Verklausungen führen.

Insgesamt wurden in den 58 Analysebächen 121 Rutschungen geschieberelevant für die Geschiebefracht am Kegelhals. Diese bilden die Grundlage der folgenden Auswertungen.

7.2.1 Auslösepunkte von Rutschungen

Sterchi (2007) untersuchte alle Auslösepunkte der 121 geschieberelevanten Rutschungen hinsichtlich den einzelnen Einflussfaktoren Hangneigung, Lithologie, Bodenbedeckung und Distanz zum Gerinne. Die folgenden Ergebnisse stammen aus diesen Arbeiten. Dabei muss beachtet werden, dass es sich bei den folgenden Diagrammen um reine Häufigkeitsdarstellungen der Daten aus den 58 Analysebächen handelt, welche nicht als allgemein gültige Aussagen gebraucht werden dürfen. So darf aus Abb. 7-4 beispielsweise nicht der allgemein gültige Schluss gezogen werden, dass die Rutschungsanfälligkeit in Moräne doppelt so gross ist wie in Kalk. Für eine solche Aussage müsste die Häufigkeitsverteilung aller Flächen in den 58 Analysegebieten als eine Grundgesamtheit ausgewertet und in die Analyse einbezogen werden.

In Abb. 7-3 ist der Einfluss der Hangneigung J_{HANG} auf die Rutschungs-Auslösepunkte der Analysebäche in einem Häufigkeitsdiagramm dargestellt. Die Daten sind annähernd normalverteilt. Am häufigsten sind Rutschungen bei einer Hangneigung von 30° bis 35° vorgekommen. 90 % der Auslösepunkte hatten eine Hangneigung zwischen 20° und 48° . Diese Erkenntnisse decken sich mit anderen Untersuchungen, z.B. in Rickli (2001), Rickli und Bucher (2003) oder Hamberger (2007).

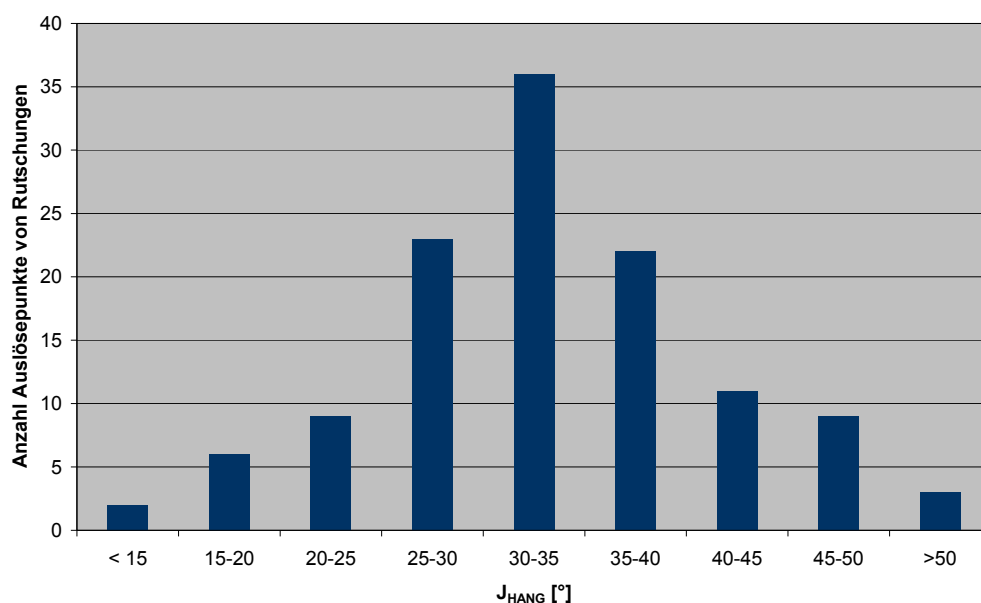


Abb. 7-3: Einfluss der Hangneigung auf die Häufigkeit der Auslösepunkte (verändert nach Sterchi 2007)

In Abb. 7-4 sind die Anzahl Auslösepunkte pro Lithologiekategorie der Atlasblätter des Geologischen Atlas der Schweiz (1 : 25'000) ersichtlich. Am meisten Rutschungen wurden im Moränenmaterial ausgelöst. Stark vertreten sind auch Auslösepunkte über Kalk, Flysch, Gneis und Bündnerschiefer.

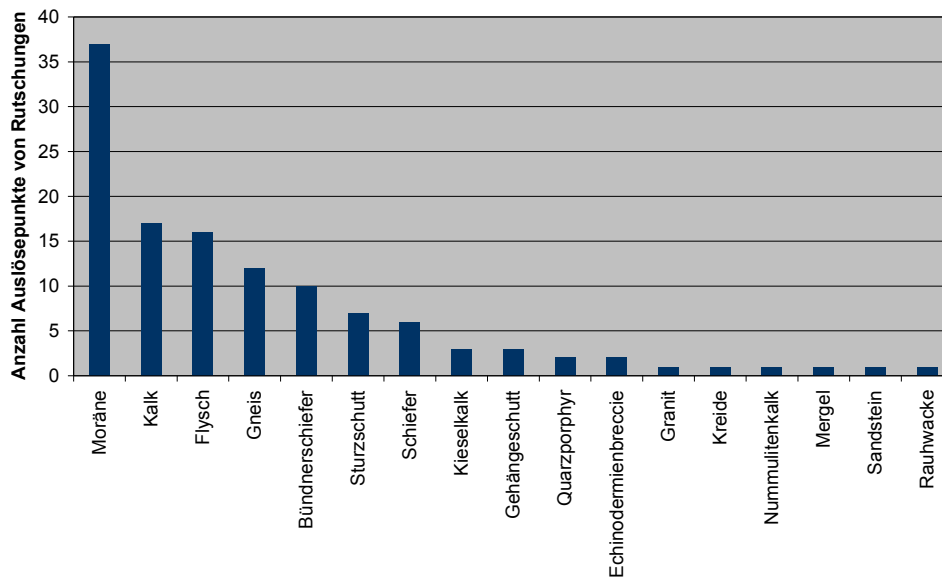


Abb. 7-4: Einfluss der Lithologie auf die Häufigkeit der Auslösepunkte (verändert nach Sterchi 2007)

Auswertungen wurden auch mit dem Datensatz „Lockermaterialangebot“ durchgeführt, welcher einen Verschnitt zwischen dem Datensatz der Lithologie und jenem der Primärflächen darstellt (vgl. auch Kap. 3.4.1.3 bis Kap. 3.4.1.5). Dabei wurden die entsprechenden Flächen nach dem Schema in Tab. 7-2 klassiert:

Tab. 7-2: Klassifikation des Datensatzes „Lockermaterialangebot“

Primärflächendatensatz	Lithologiedatensatz	Klassifikation „Lockermaterialangebot“
Felsfläche	Fels oder Lockermaterial	Fels F
Nicht-Felsfläche	Fels	Lockermaterial limitiert LML
Nicht-Felsfläche	Lockermaterial	Lockermaterial unlimitiert LMUL

Die Auswertungen mit dem Lockermaterial-Datensatz zeigen, dass der grösste Anteil der Rutschungsauslösepunkte im limitierten Lockermaterial lagen (61%), etwas weniger im unlimitierten Lockermaterial (38%), im Fels 1%.

Bei der Betrachtung der Auslösepunkte in Abhängigkeit von der Bodenbedeckung aus dem Primärdatensatz ist ersichtlich (vgl. Abb. 7-5), dass die Klassen Wald und Übriges, was in Wildbacheinzugsgebieten meistens Weide, Wiese oder bewirtschaftete Alpflächen bedeutet, nahezu gleich vertreten sind und den Hauptanteil ausmachen. Zusätzliche Auswertungen mit dem Einflussfaktor Hangneigung zeigten, dass die durchschnittliche Hangneigung der Rutschungsauslösepunkte in den Analyseebenen in bewaldeten Gebieten mit 35° deutlich höher liegt als im Gebiet „Übriges“ mit 30°.

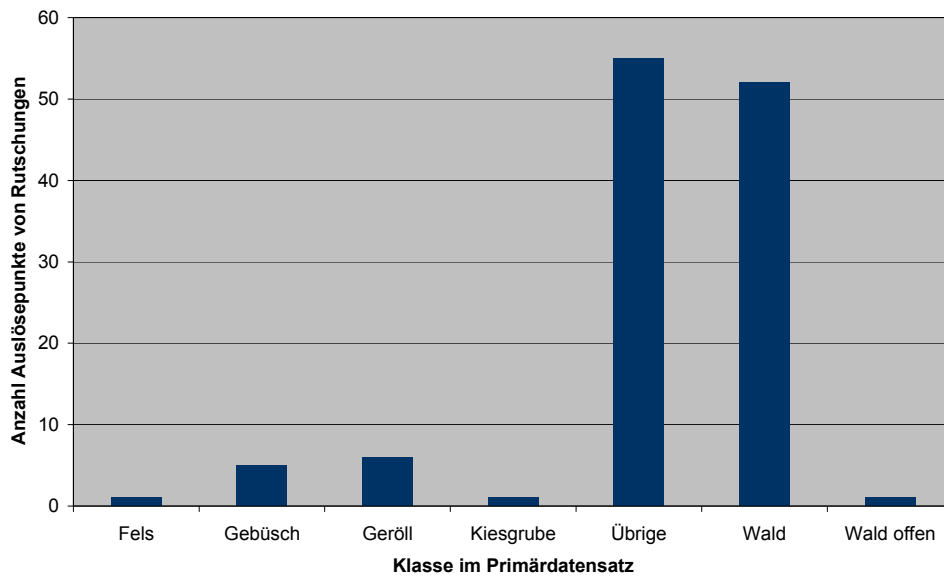


Abb. 7-5: Einfluss der Bodenbedeckung auf die Häufigkeit der Auslösepunkte (verändert nach Sterchi 2007)

Auch die Distanz der Auslösepunkte zum Gerinne wurde ausgewertet. Abb. 7-6 zeigt die Ergebnisse. 75% der Auslösepunkte von Rutschungen mit Geschiebelieferung bis in das Gerinne befanden sich näher als 100 m vom Gerinne entfernt, 90% näher als 150 m.

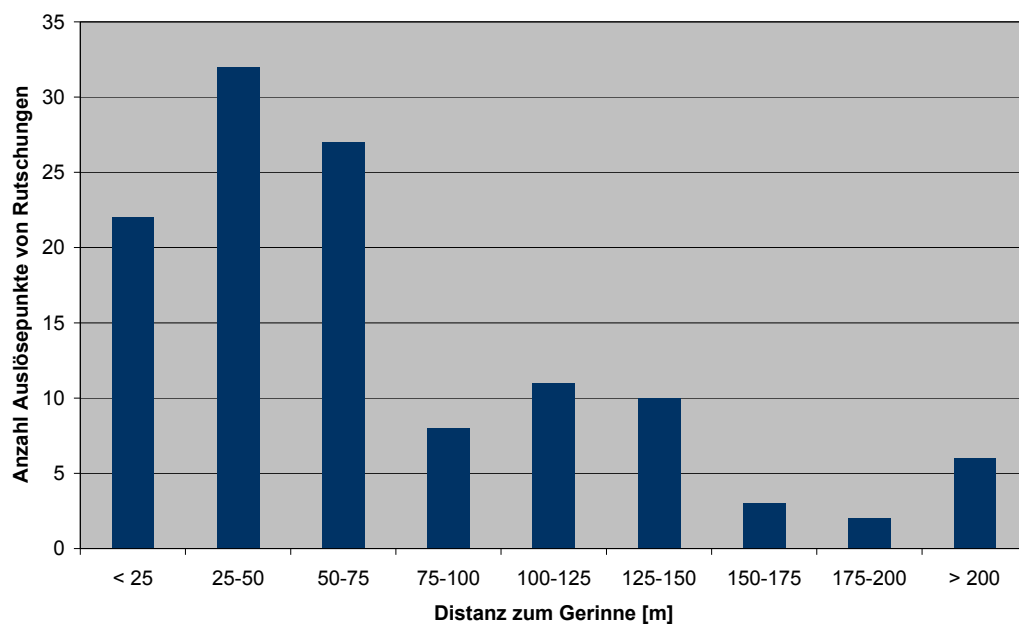


Abb. 7-6: Distanz der Rutschungs-Auslösepunkte zum Gerinne (verändert nach Sterchi 2007)

7.2.2 Gelieferte Volumina

7.2.2.1 Gelieferte Volumina pro Rutschung

Abb. 7-7 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Volumina aller 121 untersuchten Rutschungen. Ein Grossteil der Rutschungen (43%) lieferte ein Volumen $< 500 \text{ m}^3$. Über 60% der Rutschungen hatten ein Volumen von $< 1000 \text{ m}^3$. 90% der Rutschungen lieferten ein Volumen in das Gerinne, das kleiner als $10'000 \text{ m}^3$ war.

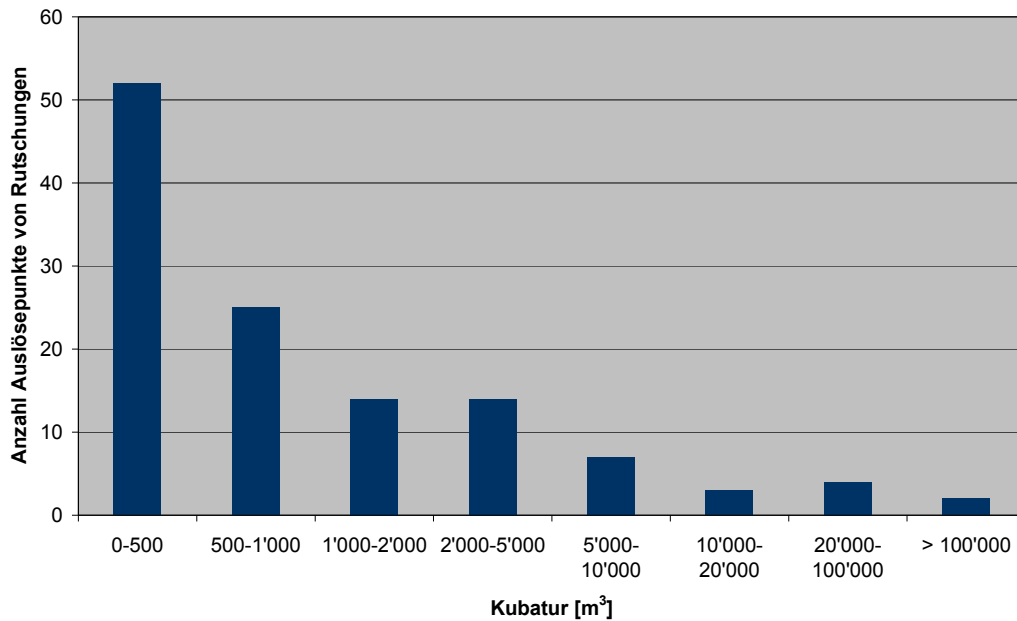


Abb. 7-7: Häufigkeitsdiagramm der Rutschungskubaturen (verändert nach Sterchi 2007)

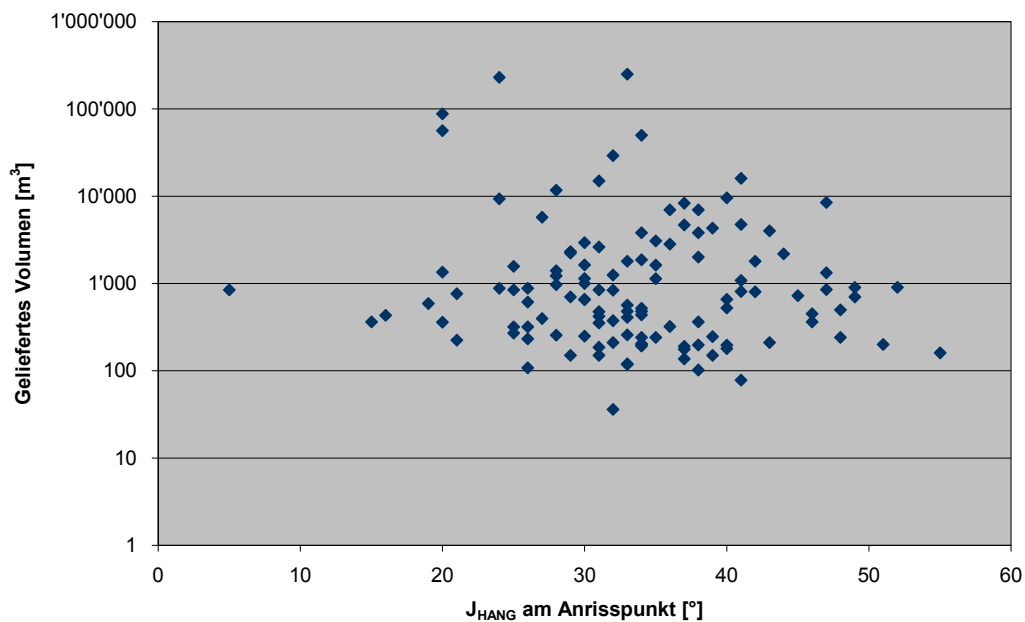


Abb. 7-8: Gelieferte Rutschungsvolumina in Abhängigkeit von der Hangneigung am Auslösepunkt

In Abb. 7-8 ist die Verteilung der in das Gerinne gelieferten Volumina in Abhängigkeit von der Hangneigung am Anrisspunkt ersichtlich. Die grössten Volumina sind in einem Bereich zwischen 20° und 35° geliefert worden. Sowohl bei kleineren als auch bei grösseren Neigungen des Geländes nimmt das jeweilige Volumen der Rutschungen wieder ab. Der Grund liegt bei der unteren Grenze bei der limitierenden Hangneigung. Es ist zu flach, damit grössere Kubaturen in Bewegung gebracht werden könnten. Die obere Grenze wird laut Moser (1997) durch das limitierte Lockermaterialangebot bei grossen Hangneigungen gebildet.

Die 6 Rutschungen mit gelieferten Volumina $> 20'000 \text{ m}^3$, also die Gerinneabschnitte mit dem Negativfaktor „Grossrutschung“ (GR) wurden zusätzlich hinsichtlich ihrer Lithologie und dem Lockermaterialangebot ausgewertet. Es sind dies die Gerinneabschnitte Flibach (38-1), Gangbach (49-1), Glyssibach (1-1), Schwarzbächli (5-1), Acherlibach (34-2) und Haldibach (29-2). 2 Rutschungen mit einem Rutschungsvolumen lösten sich in der Lithologiekategorie „Moräne“, 2 im „Flysch“ und je eine in der Klasse „Kalk“ und „Rauhwacke“. Bezüglich des Lockermaterialangebots lösten sich 4 Rutschungen in der Klasse „Lockermaterialangebot limitiert“, 2 in der Klasse „Lockermaterial unlimitiert“. Es zeigte sich somit, dass der Datenlayer „Lockermaterialangebot“ auch im Hang nur bedingt geeignet ist, das tatsächliche Lockermaterialangebot zu beschreiben und damit die Disposition zur Auslösung grosser Rutschungskubaturen.

Um einen allfälligen Zusammenhang zwischen den gelieferten Volumina und der Bodenbedeckung zu finden, wurden die Auslösepunkte aller Rutschungen mit einem Volumen $< 10'000 \text{ m}^3$ hinsichtlich der Primärflächenklasse „Übrige“ (Weide, Wiese) und „Wald“ ausgewertet. Die Rutschungen mit grösseren Volumina wurden nicht berücksichtigt, da bei diesen der Gleithorizont mit grosser Wahrscheinlichkeit tiefgründig war und dadurch die mechanische Wirkung von Wald nicht mehr vorhanden ist. Tab. 7-3 zeigt die Resultate dieser Analyse. Der Mittelwert der gelieferten Volumina liegt im bewaldeten Gebiet auf tieferem Niveau als im Gebiet „Übriges“.

Tab. 7-3: Mittelwerte der Rutschungs-Lieferungsvolumina aller Rutschungen $< 10'000 \text{ m}^3$ ausgelöst in der Primärflächenklasse „Wald“ und „Übriges“:

	Mittelwert [m^3]
Auslösepunkt der Rutschung Primärflächenklasse „Wald“ N=50	1130
Auslösepunkt der Rutschung Primärflächenklasse „Übriges“ N=47	1305

7.2.2.2 Gelieferte Volumina durch Hangprozesse pro Gerinneabschnitt

In einem weiteren Analyseschritt wurde bei sämtlichen Gerinneabschnitten das gesamte aus dem Hang in den Abschnitt gelieferte Geschiebevolumen (sowohl durch Runsen als auch durch Rutschungen) aufsummiert.

Im GIS wurden die seitlichen Hänge jedes Gerinneabschnitts auf eine Distanz von 100 m abgegrenzt (H_{100}). Anschliessend wurden in dieser Fläche sämtliche Pixel ausgeschieden, in denen die Hangneigung zwischen 20° und 48° lag (= 90% der Auslösepunkte lagen in diesem Bereich, vgl. Kap. Abb. 7-3) und die Bodenbedeckung nicht aus Fels besteht (H_{pot}). Durch dieses Vorgehen wurden somit die präferenziellen Auslösepunkte für potenzielle Rutschungen extrahiert. Anschliessend wurde das Flächen-Verhältnis von diesen potenziellen Anrisspunkten zur gesamten Fläche 100 m neben dem Gerinne H_{pot}/H_{100} gebildet. Dieses Verhältnis gibt eine Gröszenordnung über die generelle Auslöse-Wahrscheinlichkeit von Rutschungen im Gerinneabschnitt an.

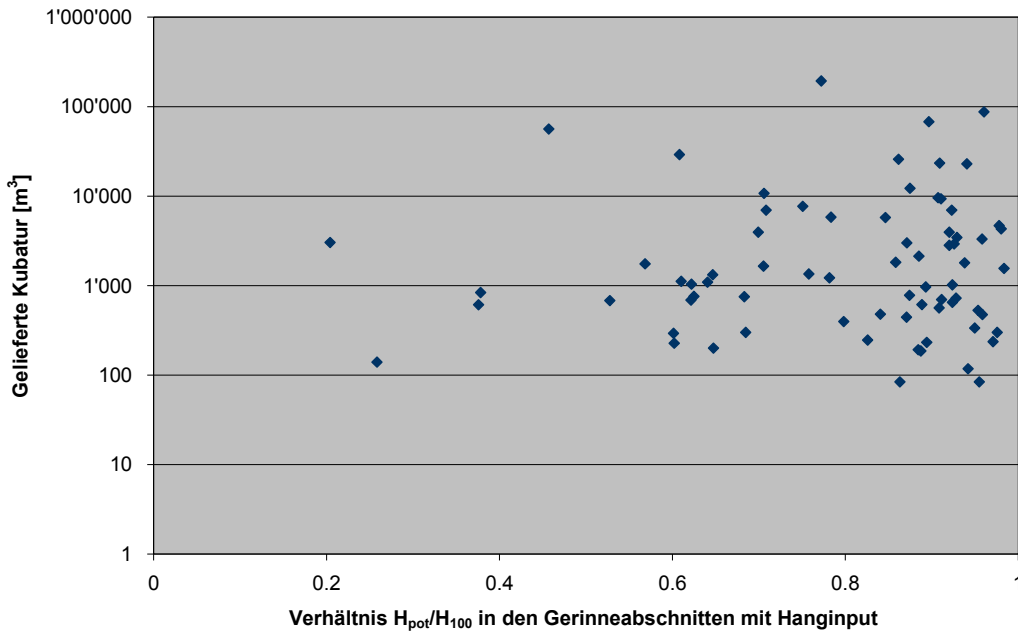


Abb. 7-9: Geschiebelieferung aus dem Hang pro Gerinneabschnitt in Abhängigkeit vom Anteil der potenziellen Auslösefläche von Rutschungen an der Gesamtfläche 100 m entfernt von der Gerinneachse H_{pot}/H_{100}

In Abb. 7-9 sind die Geschiebevolumen aus dem Hang pro Gerinneabschnitt in Abhängigkeit des Verhältnisses H_{pot}/H_{100} abgebildet. Dabei zeigt sich folgendes Bild:

- Bei einem Verhältnis H_{pot}/H_{100} von **0-0.2** wurde in keinem Gerinneabschnitt Geschiebe durch Hangprozesse geliefert.
- Bei einem Verhältnis H_{pot}/H_{100} von **0.2-0.6** beschränkte sich die gelieferte Kubatur aus dem Hang in den meisten Fällen auf maximale Volumina von $3'000 \text{ m}^3$.
- Erst ab einem Verhältnis von $H_{pot}/H_{100} > 0.6$ wurden grössere gelieferte Geschiebevolumina in den Gerinneabschnitten verzeichnet.

Zusätzlich wurden von der Fläche H_{100} sämtliche Pixel ausgeschieden, welche eine Bodenbedeckung von Fels haben (H_F) und ebenfalls das Verhältnis H_F/H_{100} gebildet. Dieses Verhältnis gibt eine Grössenordnung über den Anteil anstehendem Fels im nahen Gerinnebereich an, was eine grobe Aussage über die Mächtigkeit potenzieller Rutschungen erlaubt. Bei grossen Felsanteilen, wird in der Umgebung die Auflage und Mächtigkeit des Lockermaterial wahrscheinlich nicht sehr hoch sein.

In Abb. 7-10 wurde das Verhältnis H_F/H_{100} den aus dem Hang gelieferten Kubaturen pro Gerinneabschnitt gegenübergestellt. Dabei konnten folgende Schwellenwerte beobachtet werden:

- Bei Verhältnissen $H_F/H_{100} > 0.4$ waren mit 2 Ausnahmen praktisch keine Hangprozesse aktiv.
- Volumina aus dem Hang zwischen $1'000$ bis $5'000 \text{ m}^3$ kamen erst bei einem **Verhältnis $H_F/H_{100} < 0.3$** vor.
- Hangprozesse mit einem Gesamtvolumen pro Gerinneabschnitt von $> 10'000 \text{ m}^3$ erfolgten mit einer Ausnahme nur bei einem Verhältnis H_F/H_{100} **von < 0.01** . Die Ausnahme bildet die Rutschung im Glyssibach (1-1) mit einem Verhältnis H_F/H_{100} von 0.31, bei welcher es sich um eine Felsrutschung gehandelt hat.

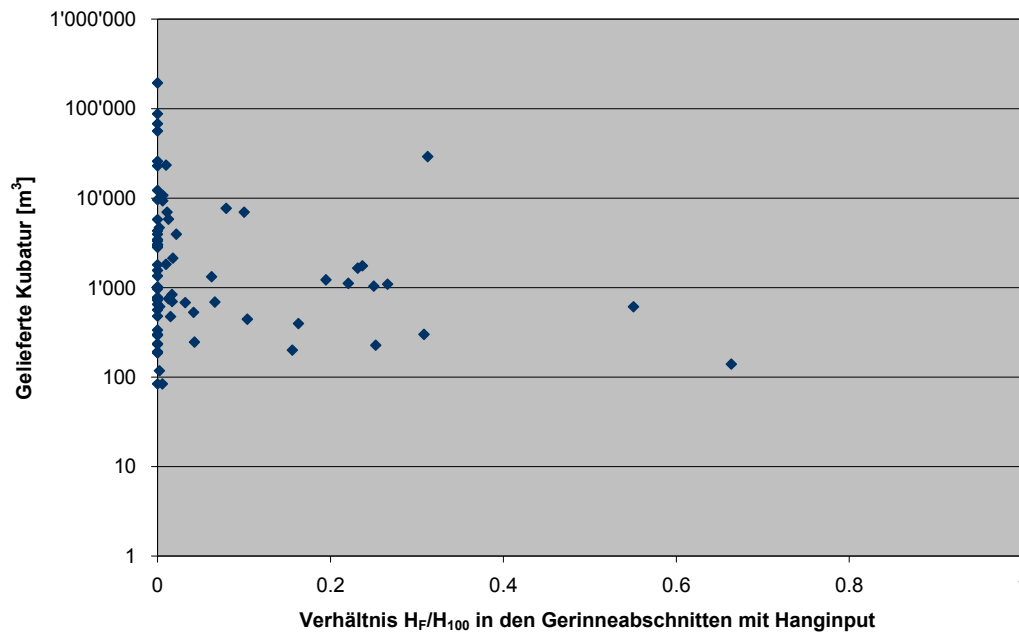


Abb. 7-10: Geschiebelieferung aus dem Hang pro Gerinneabschnitt in Abhängigkeit vom Anteil der Felsflächen an der Gesamtfläche 100 m entfernt von der Gerinneachse H_F/H_{100}

7.2.3 Mobilisierung im Gerinne

Wenn Geschiebe durch vorgehend beschriebene Prozesse in ein Gerinne geliefert wird, stellt sich die Frage, ob dieses anschliessend durch den Abfluss im Gerinne überhaupt mobilisiert werden kann und ob sich allenfalls eine Verklausung bilden kann. Die Mobilisierung von Geschiebe aus dem Hang hängt von der Transportkapazität bei der Einmündungsstelle im Gerinne ab. Diese wiederum ist abhängig vom verfügbaren Abfluss und von der Gerinneneigung. Es ist zudem entscheidend, wie gross das aus dem Hang gelieferte Geschiebevolumen ist.

Bei den analysierten Grossereignissen wurde in 73 Gerinneabschnitten Geschiebe durch Hangprozesse in das Gerinne geliefert. Sie bilden die Datengrundlage für die folgenden Ausführungen. Von den 73 Gerinneabschnitten wurde das gesamte aus dem Hang gelieferte Geschiebe in 66 Gerinneabschnitten im Gerinne vollumfänglich mobilisiert, in 4 Gerinneabschnitten teilmobilisiert ohne Verklausung und in 3 Gerinneabschnitten teilmobilisiert unter der Bildung einer Verklausung.

In Abb. 7-11 wurden die Gerinneabschnitte klassiert nach dem Geschiebevolumen, das aus dem Hang geliefert wurde. Dabei ist erkennbar, dass Teilmobilisierungen mit und ohne Verklausung nur bei Volumina $> 10'000 \text{ m}^3$ stattgefunden haben.

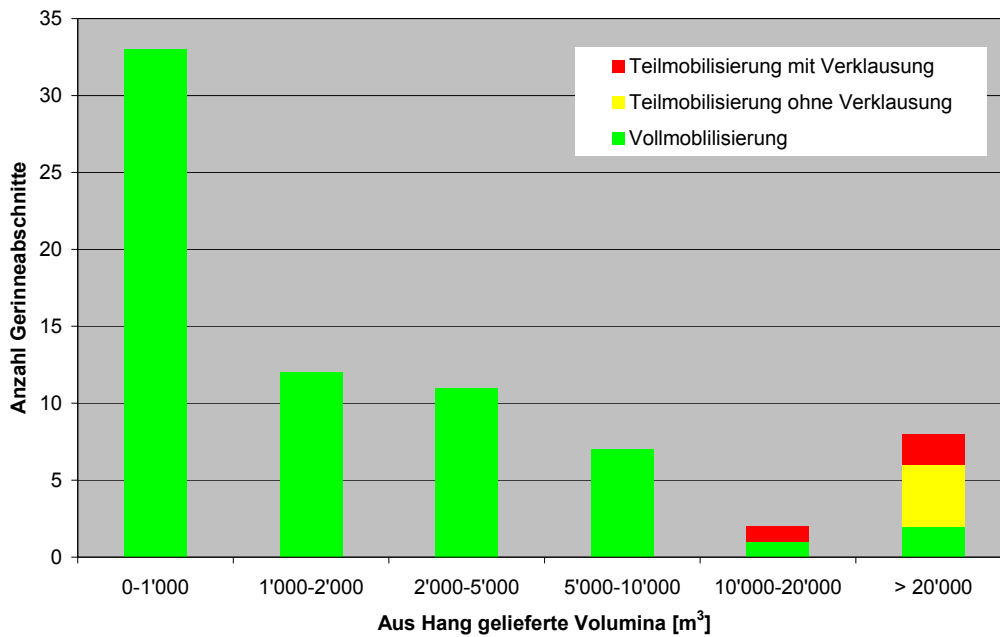


Abb. 7-11: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang in Abhängigkeit von den gelieferten Geschiebevolumina

Abb. 7-12 zeigt die Verteilung der Mobilisierung von Hanginput in die verschiedenen Gerinneabschnitte in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche oberhalb und Gerinneneigung im Gerinneabschnitt. Grundsätzlich kann eine Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche und der Gerinneneigung gesehen werden. Je steiler der Gerinneabschnitt ist und je grösser die Einzugsgebietsfläche, umso eher wird das Geschiebe vollumfänglich mobilisiert. Die Gerinneabschnitte mit „Teilmobilisierung ohne Verklauung“ liegen im Vergleich zu jenen „mit Verklauung“ eher in steilerem Gelände und haben kleinere Einzugsgebietsflächen. Demgegenüber fanden Verklauungen eher in flacheren Gerinneabschnitten mit grösserer Einzugsgebietsfläche statt. Der Grund dafür ist sehr wahrscheinlich in der konkaven Geometrie von Wildbacheinzugsgebieten zu finden. Damit sich eine grössere Verklauung überhaupt bilden kann, ist ein angemessener Rückhalteraum im Gerinne erforderlich. Diese sind praktisch nur in flacheren Gerinneabschnitten in den unteren Bereichen der Einzugsgebiete vorhanden. Oben im Einzugsgebiet gelegene Gerinneabschnitte verfügen aufgrund der Steilheit meist gar nicht über solche Rückhalteräume, in denen sich grössere Verklauungen bilden könnten.

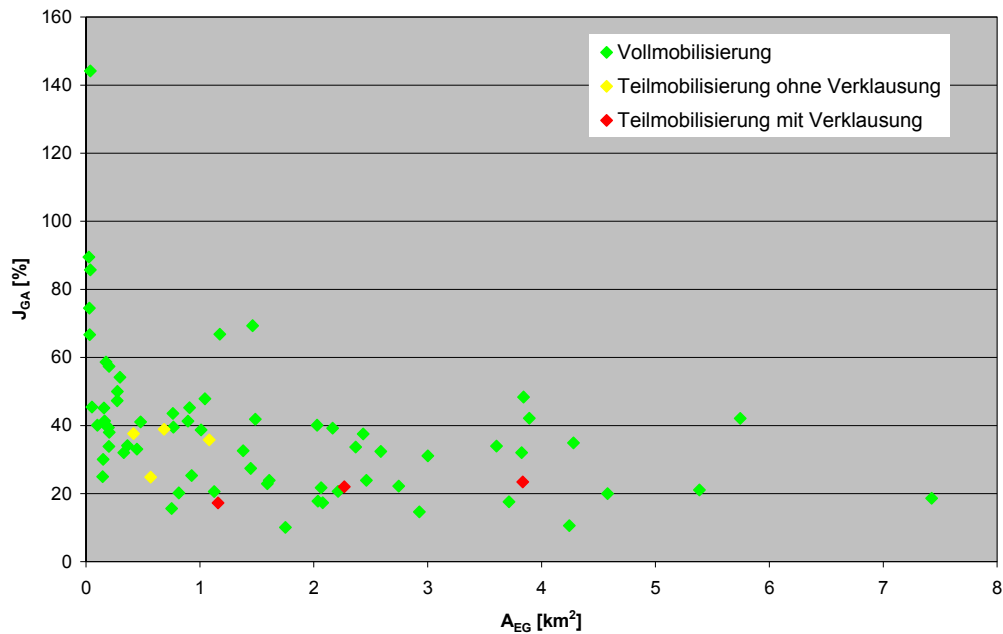


Abb. 7-12: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche oberhalb des Gerinneabschnitts und von der mittleren Gerinneneigung im Gerinneabschnitt

Es ist davon auszugehen, dass neben den lokalen Standortfaktoren Gerinneneigung und Einzugsgebietsfläche auch die Einflussfaktoren der „Bedingungen oberhalb“ (z.B. der Transportprozess bei der Einmündungsstelle oder allfällige freie Transportkapazität in Form von grösseren Geschwindigkeiten des Abflusses in Form von hohen $E-I_{akk}$ Werten) und „Negativfaktoren“ einen begünstigenden Einfluss auf die Mobilisierung von Geschiebe aus dem Hang im Gerinne haben können. Abb. 7-13 und Abb. 7-14 zeigen die Mobilisierung von Geschiebe aus dem Hang in Abhängigkeit vom Transportprozess, abflussbeeinflussenden Negativfaktoren und erhöhten $E-I_{akk}$ Werten im Gerinne, je getrennt nach dem gelieferten Volumen von 0-1'000 m³, resp. 1'000-5'000 m³.

Bei gelieferten Volumen zwischen 0-1'000 m³ (Abb. 7-13) wurde das Material in allen Gerinneabschnitten vollumfänglich mobilisiert. Die mobilisierungsfördernden Faktoren scheinen hier nicht notwendig zu sein, da die lokalen Standortfaktoren bereits ausreichen, um diese kleinen Volumina aus dem Hang vollumfänglich zu mobilisieren. Bei gelieferten Volumen zwischen 1'000-5'000 m³ (Abb. 7-14) wurde das Geschiebe aus dem Hang ebenfalls überall vollmobilisiert. In der Grafik fällt auf, dass an der unteren Grenze der Punktwolke 3 von 6 Gerinneabschnitte durch mobilisierungsfördernde Faktoren (Negativfaktor „Kluftwasser“ (KW), „Flutwelle“ (FW) oder „Verklauung in oberen Gerinneabschnitten“ (VK), $E-I_{akk} > 50$) gekennzeichnet sind. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass bei limitierenden Bedingungen - hier einer relativ geringen Gerinneneigung um die 15% - allenfalls abflussbeeinflussende Negativfaktoren oder hohe $E-I_{akk}$ Werte unterstützend für die Mobilisierung im Gerinne wirken. Mangels Gerinneabschnitten mit Teilmobilisierung in dieser Volumenklasse, kann diese Tendenz jedoch nicht abschliessend beurteilt werden.

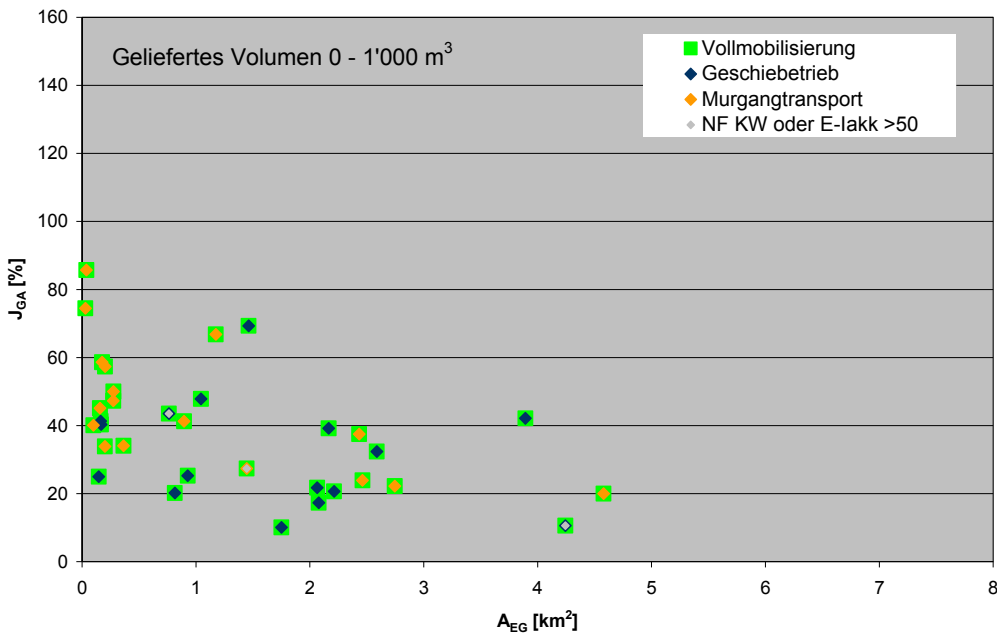


Abb. 7-13: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang bei gelieferten Volumina von 0-1'000 m³ in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche, Gerinneneigung, vom Transportprozess, abflussbeeinflussenden Negativfaktoren und erhöhten E-I_{akk} Werten

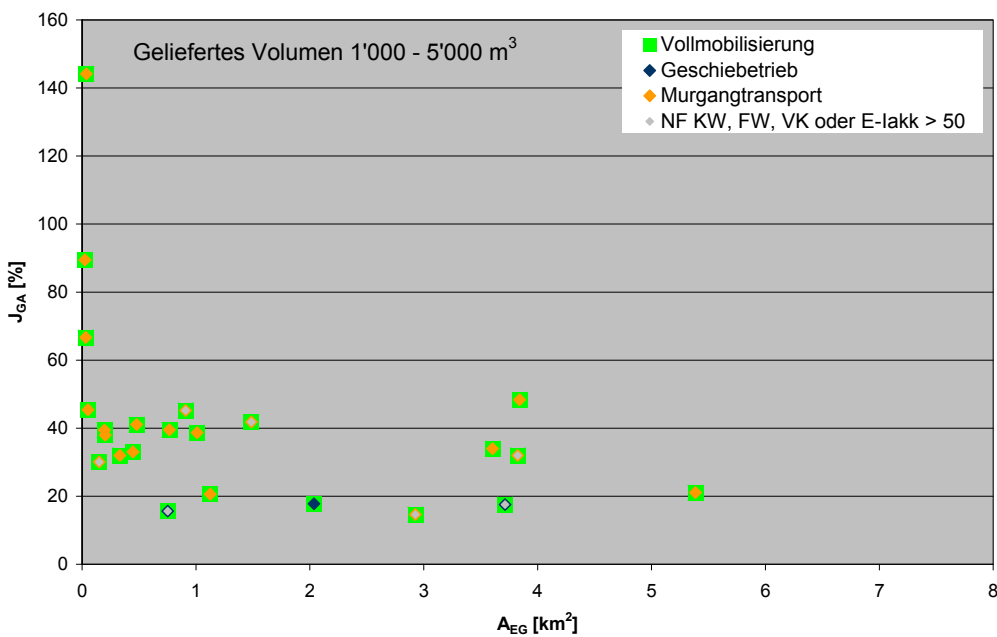


Abb. 7-14: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang bei gelieferten Volumina zwischen 1'000-5'000 m³ in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche, Gerinneneigung, vom Transportprozess, abflussbeeinflussenden Negativfaktoren und erhöhten E-I_{akk} Werten

Bei grösseren gelieferten Volumina von 5'000-20'000 m³ (vgl. Abb. 7-15) befindet sich ein Gerinneabschnitt, bei dem nicht der gesamte Hanginput vollmobilisiert werden konnte und bei dem es eine Verkläuerung gab. Es ist der Gerinneabschnitt im Rio de Tennasses (50-1). Beim Grossereignis im Rio de Tennasses handelt es sich um einen Spezialfall, weil das Ereignis im Winter stattgefunden hat. Der Bach führte kein Hochwasser, als die Rutschung ausgelöst wurde, was

durch den Parameter Einzugsgebietsfläche, die ja stellvertretend für den Abfluss stehen soll, nicht berücksichtigt wird. Der Einmündungswinkel der Rutschung lag in der Klasse 90° (vgl. Kap. 6.1.1.5). Durch diese Schubrichtung quer zur Fliessrichtung des Gerinnes wurden die Bedingungen für eine Verklauung begünstigt.

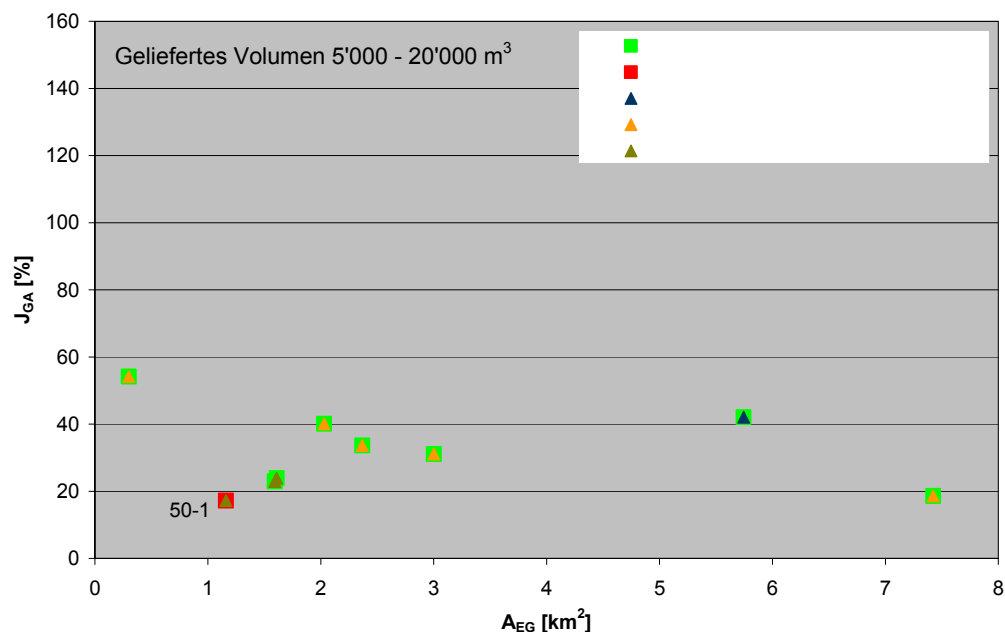


Abb. 7-15: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang bei gelieferten Volumina zwischen 5'000-20'000 m³ in Abhängigkeit vom Mündungswinkel

Insgesamt wurden in 8 Gerinneabschnitten Volumina $> 20'000 \text{ m}^3$ geliefert (vgl. Abb. 7-16: Glyssibach (1-1), Schwarzbächli (5-1), Flibach (38-1), Acherlibach (34-1), Edisriederbach (37-2), Haldibach (29-2), Gangbach (49-1) und Val Varuna (22-7)). Diese Gerinneabschnitte können in verschiedene Gruppen eingeteilt werden.

In den Gerinneabschnitten Edisriederbach (37-2) und Val Varuna (22-7) wurden im Gegensatz zu allen anderen Gerinneabschnitten die Volumina aus dem Hang vollumfänglich im Gerinne mobilisiert. Auffallend dabei ist, dass diese beiden Abschnitte die einzigen sind, in denen aus dem Hang nicht eine einzelne spontane Grossrutschung ausgelöst wurde, sondern dass in diesen Gerinneabschnitten mehrere Rutschungen und Hangmuren an verschiedenen Orten abgingen. Dadurch konnte sich der Hanginput einerseits räumlich auf die gesamte Länge des Gerinneabschnitts und sich andererseits vermutlich auch zeitlich während der gesamten Ereignisdauer verteilen. Mehrere Inputstellen haben somit einen räumlichen und zeitlichen Dosierungseffekt, wodurch vermutlich in der Gesamtheit eine grössere Geschiebemenge aus dem Hang im Gerinne mobilisiert werden kann.

Die Gerinneabschnitte Glyssibach (1-1), Schwarzbächli (5-1), Flibach (38-1) und Acherlibach (34-1) zeigten alle Teilmobilisierung ohne Verklauung, während in den Gerinneabschnitten Haldibach (29-2) und Gangbach (49-1) eine Verklauung erfolgte. Auffallend ist, dass die 4 Gerinneabschnitte mit „Teilmobilisierung ohne Verklauung“ alle in Gerinneabschnitten mit relativ kleinen Einzugsgebieten ausgelöst wurden und alle einen Mündungswinkel von 0° oder 45° hatten. Die Gerinneabschnitte, in welchen Verklauungen stattgefunden haben sind demgegenüber durch grosse Einzugsgebietsflächen und einem Mündungswinkel von 90° gekennzeichnet. Vermutlich hängen die beiden Einflussfaktoren Mündungswinkel und Einzugsgebiets-

grösse von einander ab. In Gerinneabschnitten mit kleineren Einzugsgebietsflächen ist die Exposition der Hänge noch eher in Fließrichtung des Baches, während bei grösseren Einzugsgebieten schon eher der Charakter eines tief eingeschnittenen Hauptgerinnes und seitlichen steilen Hängen herrscht. Ausgelöste Grossrutschungen kommen somit im ersten Fall eher mit einem Mündungswinkel 0° in das Gerinne, im zweiten Fall hingegen eher aus der Richtung 90° .

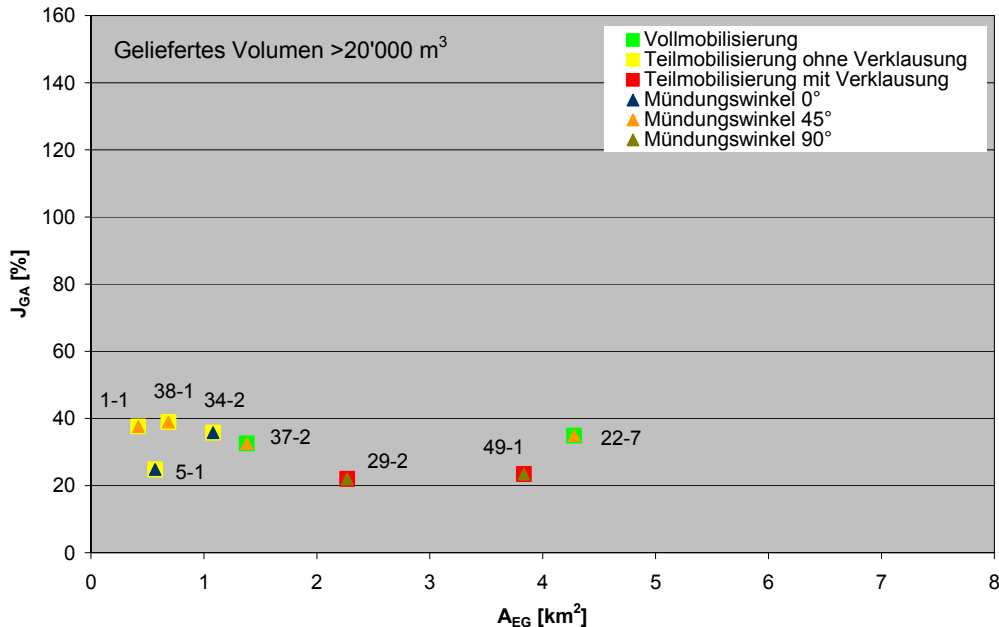


Abb. 7-16: Mobilisierung im Gerinne von Geschiebe aus dem Hang bei gelieferten Volumina von $>20'000 m^3$ in Abhängigkeit vom Mündungswinkel

Bei den Gerinneabschnitten mit „Teilmobilisierungen ohne Verklauung“ und „Teilmobilisierungen mit Verklauung“ der gelieferten Geschiebekubatur aus dem Hang im Gerinne wurde unterschiedlich viel Lockermaterial mobilisiert. Abb. 7-17 zeigt die Mobilisierungsfaktoren der verschiedenen Rutschungen im Gerinne in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgrösse oberhalb. Der Mobilisierungsfaktor ist der Anteil der im Gerinne aus dem Hang mobilisierten Geschiebekubatur (H_M) an der gesamten im Hang verlagerten Kubatur (H_L) und berechnet sich nach dem Verhältnis H_M/H_L . Wenn also aus dem Hang $100'000 m^3$ Geschiebe geliefert worden sind und im Gerinne davon $70'000 m^3$ mobilisiert wurden, beträgt der Mobilisierungsfaktor 0.7.

Anhand dieser Einzelfälle kann festgestellt werden, dass die Mobilisierungsfaktoren in den Gerinneabschnitten mit „Teilmobilisierung ohne Verklauung“ sehr heterogen sind und stark von der individuellen Situation vor Ort abhängig sind. Im Acherlibach (34-2) (vgl. Abb. 7-18), wo der Mündungswinkel der Rutschung in der Klasse 0° liegt, ist der gesamte Rutschungskomplex mit rund $400'000 m^3$ sehr gross. Eigentlich mobilisiert wurde nur ein kleiner Teil. Der Grund liegt wohl darin, dass die Rutschung sehr breit ist (140 m) und nur durch 3 kleine Gerinne entwässert wurde. Nur entlang dieser Gerinne wurde dann wirklich Lockermaterial mobilisiert. Im Glyssibach (1-1) blieb ein Teil der Fels-Rutschungsmasse im Hang und im Mündungsbereich liegen und konnte nicht weiter transportiert werden. Aus der Rutschung im Schwarzbächli (5-1) führte ein Hauptgerinne heraus, das ebenfalls aufgrund der Breite der Rutschung (95 m) nicht alles Material mobilisieren konnte. Im Flibach (38-1) wurden Teile der Rutschmasse bereits im Hang abgelagert und weiter unten hingegen wieder neu erodiert. Bei den Gerinneabschnitten, in denen eine „Teilmobilisierung mit Verklauung“ festgestellt wurde, liegen die Mobilisierungsfaktoren in einem Bereich zwischen 0.4 und 0.8. Im Gangbach (49-1) und Rio de Tennasses (50-1)

wurden Teile der Rutschungsmassen im untersten Hangbereich abgelagert. Im Haldibach (29-2) gelangte praktisch die gesamte Masse direkt in das Gerinne, da die Verhältnisse dort sehr steil und eng waren.

Aus diesen Einzelfällen Verallgemeinerungen zu machen, ist schwierig. Es kann jedoch die Tendenz beobachtet werden, dass Rutschungen, welche mit dem Einmündungswinkel 0° in das Gerinne münden, insbesondere wenn sie breit sind, eher kleine Mobilisierungsfaktoren zeigen. Rutschungen, welche Verklausungen bilden, zeigen vermutlich höhere Mobilisierungsfaktoren, da aufgrund des Aufstaus hinter der Verklausung und dem plötzlichen Durchbruch und des dadurch konzentrierten Abflusses grosse Energie für die Mobilisierung zur Verfügung steht.

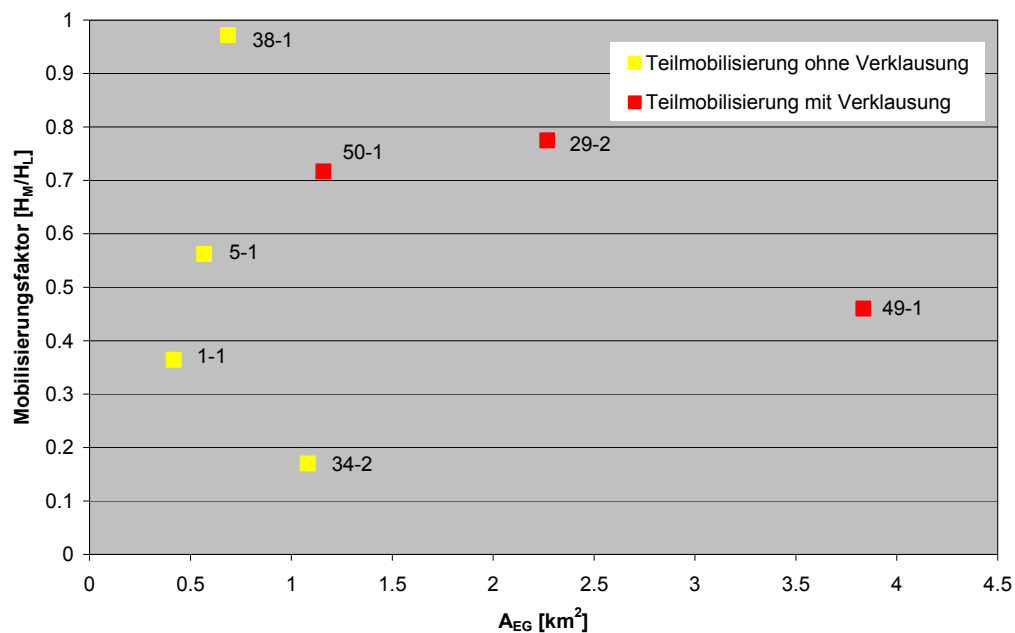


Abb. 7-17: Mobilisierungsfaktor der teilmobilisierten Rutschungen im Gerinne in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche oberhalb



Abb. 7-18: Grossrutschung im Acherlibach (34-2) (Foto: belop gmbh)

8 Geschiebeverlagerung im Gerinne

Für eine Abschätzung der Geschiebefrachten stellt sich für die/den Praktiker/in in jedem Gerinneabschnitt die Frage, ab wann durch welchen Transportprozess wie viel Geschiebe aus der Sohle und den angrenzenden Böschungen mobilisiert werden kann und ob die Transportkapazität ausreichend ist, um das mobilisierte Geschiebe weiter zu transportieren oder ob es allenfalls zu Ablagerungen im oder ausserhalb des Gerinnes kommt.

Im vereinfachten Prozesssystem Wildbach (vgl. Abb. 8-1) liegt der Fokus dieses Kapitels somit bei der Feststoffverlagerung im Gerinne mit den Verlagerungsprozessen:

- Mobilisierung durch Gerinneerosion und Seitenerosion. In der Folge werden die beiden Prozesse zusammenfassend betrachtet und es wird für beide Prozesse zusammen der Begriff „Gerinneerosion“ verwendet. Quantifiziert wird der Begriff durch die Erosionsleistung (m^3/m), welche den Erosionsquerschnitt sowohl in Sohle als auch seitlich an den Böschungen beinhaltet.
- Umlagerungs- und Ablagerungsprozesse im oder ausserhalb des Gerinnes

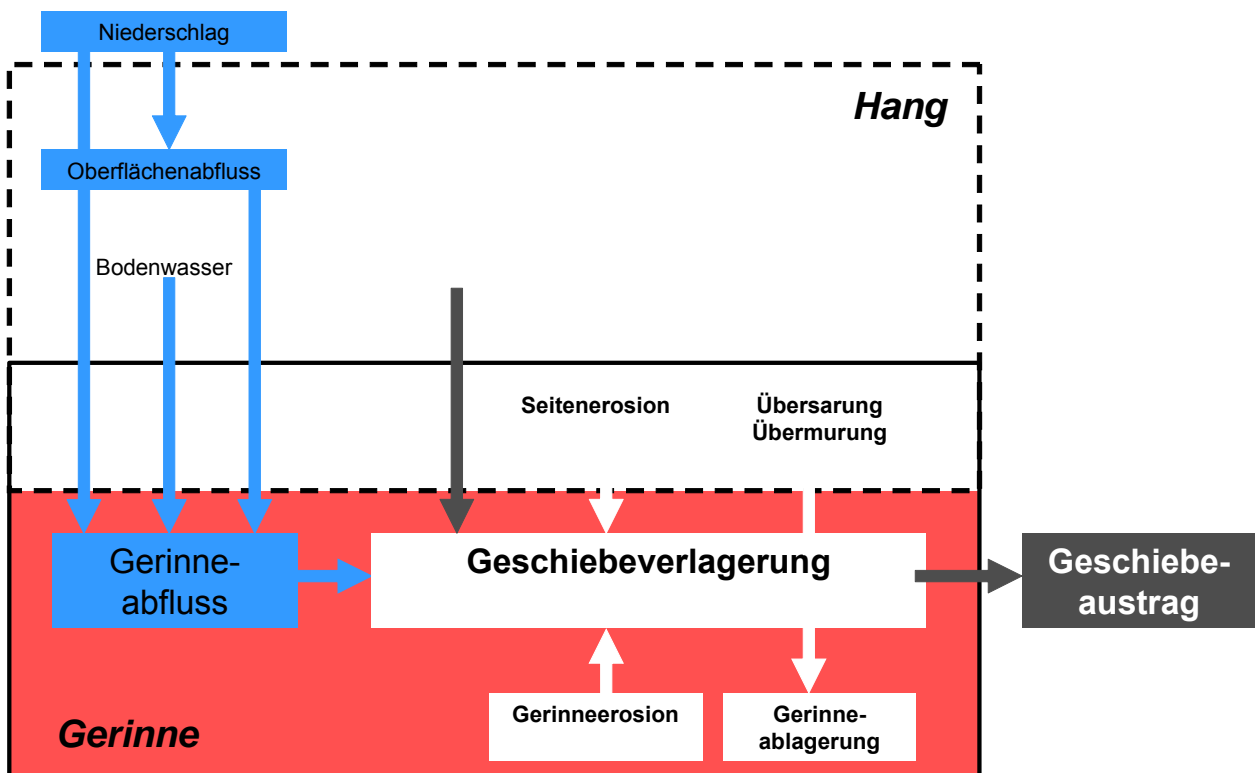


Abb. 8-1: Vereinfachtes Prozesssystem Wildbach mit Fokus auf die Geschiebemobilisierung im Gerinne (verändert nach Liener, 2000)

Da sich die Prozessmechanismen durch die beiden Transportprozesse „fluvialen Geschiebetrieb“ und „Murgang“ grundlegend unterscheiden (vgl. Kap. 2.3.4), werden die Resultate nach Transportprozess getrennt präsentiert.

8.1 Geschiebeverlagerung im Gerinne durch Murgangtransport

In 37 Analysebächen wurde im Gerinne vorwiegend Murgangtransport beobachtet, in 15 Analysebächen sowohl Geschiebetrieb als auch Murgangtransport. Dabei konnte sich entweder

- zwischenzeitlich oder aus einem Seitengerinne ein Murgang bilden, dieser wurde aber gestoppt (Sandbach (2), Schwarzbächli (5), Ri di Bedretto (40))
- oder es gab im oberen Teil des Einzugsgebiets Geschiebetrieb und weiter unten konnte sich ein Murgang bilden (Riggisalpbach (16), Chummerbach (17), Vadret da l'Alp Ota (21), Val Valdun (23), Haldibach (29), Mehlbach (31), Fangtobel (32), Acherlibach (34), Dorfbach Mörel (54))
- oder im Hauptgerinne fand Murgangtransport statt, es gab aber Seitengerinne, in welchen kein Murgangtransport vorherrschte (Tanzhubelbächli (7), Wartenberggraben (13), Humligenbach (28)).

Die Stichprobe umfasst insgesamt 255 Gerinneabschnitte mit Murgangtransport. Dabei wurde in 187 Gerinneabschnitten Erosion, in 45 Transit und in 23 Ablagerungen beobachtet.

8.1.1 Geschiebemobilisierung durch Gerinneerosion

8.1.1.1 Auslösung von Murgängen

Für die Praxis relevant ist die Frage, bei welchen Bedingungen sich durch welchen Entstehungsmechanismus ein Murgang im Gerinne bilden kann. Von den 255 Gerinneabschnitten mit Murgangtransport wurden in 74 Gerinneabschnitten Murgänge ausgelöst. Die dabei beobachteten Entstehungsmechanismen wurden in 3 Gruppen eingeteilt:

- klassische Sohlenverflüssigung (vgl. Abb. 8-2 links)
- Murgangfortsetzung aus einer Rutschung oder Hangmure (vgl. Abb. 8-2 rechts)
- Murgangauslösung durch einen der in Kap. 6.3 definierten Negativfaktoren



Abb. 8-2: Auslösungsmechanismen von Murgängen:
links: Sohlenverflüssigung im Tanzhubelbächli (7-1) (Foto: S. Zingg)
rechts: Fortsetzung einer Hangmure im Gerinne im Schwendibach (3-1) (Foto: Flotron AG)

In den 74 Gerinneabschnitten mit Murgangauslösung wurden 47% der Murgänge klassisch durch Sohlenverflüssigung ausgelöst (vgl. Abb. 8-3 und Tab. 8-1), 26% als Fortsetzung aus einer Rutschung oder Hangmure und 27% als Folge des Eintretens eines Negativfaktors oder mehrerer Negativfaktoren (vgl. dazu auch Kap. 6.3).

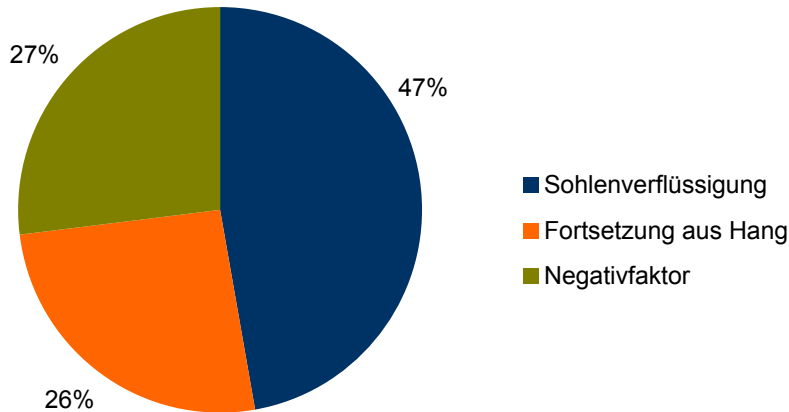


Abb. 8-3: Prozentuale Anteile der verschiedenen Murgang-Auslösemechanismen in den Analyseebächen

Tab. 8-1: Entstehungsmechanismen der 74 Gerinneabschnitte mit Murgangauslösung

Murgangauslösung durch Sohlenverflüssigung im Gerinne	Murgangauslösung durch Fortsetzung aus Hangmure	Murgangauslösung durch einen oder eine Kombination aus Negativfaktoren
Sandbach (2-3)	Schwendibach (3-1)	Rotlauibach (4-3), Bastionsmoräne BM
Rotlauibach (4-1, 4-2, 4-6)	Indrist Weid (8-1)	Reuses Du Dolent (53-1), Bastionsmoräne BM
Tanzhubelbächli (7-1)	Spissibach (9-1)	Ritigraben (58-1, 58-2), Permafrost PF
Louwibach (11-1)	Fallbach (10-1, 10-2)	Saxé (52-1), Ausräumung auf Stauhorizont AS
Riggisalpbach (16-5, 16-6)	Spissgraben (12-1)	Minstigerbach (55-1), Ausräumung auf Stauhorizont AS
Alpenbach (18-1, 18-2)	Wartenberggraben (13-1)	Acherlibach (34-2), Grossrutschung GR
Schwenditobel (19-1, 19-5)	Milibach (14-1)	Schwarzbächli (5-1), Grossrutschung GR
Val Farbertg (25-1)	Betelriedgraben (15-1)	Glyssibach (1-1), Grossrutschung GR
Val Gronda (26-1)	Chummerbach (17-4)	Flibach (38-1), Grossrutschung GR
Mehlbach (31-9)	Humligenbach (28-2)	Haldibach (29-2), Grossrutschung & Verklausung GRVK
Acherlibach (34-3)	Edisriederbach (37-1)	Gangbach (49-1), Grossrutschung & Verklausung GRVK
Dorfbach (36-1, 36-2)	Usser Dorfbach (39-1)	Vadret da l'Alp Ota (21-3), Flutwelle FW
Ri di Bedretto (40-2)	La Guasta (41-1)	Röte Bach (6-1), Flutwelle FW
Ri di Ronco (43-1, 43-5, 43-7, 43-10)	Holdenbach (45-1, 45-4, 45-5)	Lauibach (27-1), Kluftwasser KW
Ruchtal (44-1)	Näsitalbach (46-4)	Fangtobel (32-2), Kluftwasser KW
Näsitalbach (46-1, 46-2)	Chiletal (47-1)	Val Valdun (23-5), Mehrere Mündungen 3HG
Tüfelital (48-1)		Val Varuna (22-1), Verklausung VK
Gangbach (49-3)		Rio de Tennasses (50-1), Verklausung VK
Nant du Pissot (51-1, 51-2, 51-4, 51-8)		Plaunca (24-1), Verklausung & Ausräumung auf Stauhorizont VKAS
Dorfbach (54-2)		
Bruchji (56-1, 56-2)		

In Anlehnung an Zimmermann et al. (1997) wurde der Zusammenhang zwischen der Gerinne- neigung bei der Murgangauslösung und der Grösse der Einzugsgebietsfläche oberhalb analysiert. „Die Mobilisierung von Geschiebe hängt einerseits von der Stabilität des Lockermaterials

im Gerinne, andererseits von der Schleppspannung des Wassers ab. Die Stabilität des Lockermaterials ist von den Materialeigenschaften und der Steilheit der Ablagerung abhängig, die Schleppspannung zusätzlich noch vom Abfluss. Je näher die Neigung eines Lockermaterialdepots am Grenzgefälle liegt, umso geringere Schleppspannungen genügen für die Geschiebemobilisierung. Ist das Depot relativ stabil, bedingt dies bedeutend grössere Schleppspannungen für dessen Mobilisierung.“ (Zimmermann et al. 1997) Aus einer Vielzahl an Daten zu Auslösungspunkten von Murgängen im Gerinne und den entsprechenden Auslösemechanismen leiteten Zimmermann et al (1997) eine Formel zur Berechnung des Grenzgefälles her, ab welcher bei gegebener Einzugsgebietsfläche Murgänge ausgelöst werden können (vgl. Abb. 8-4).

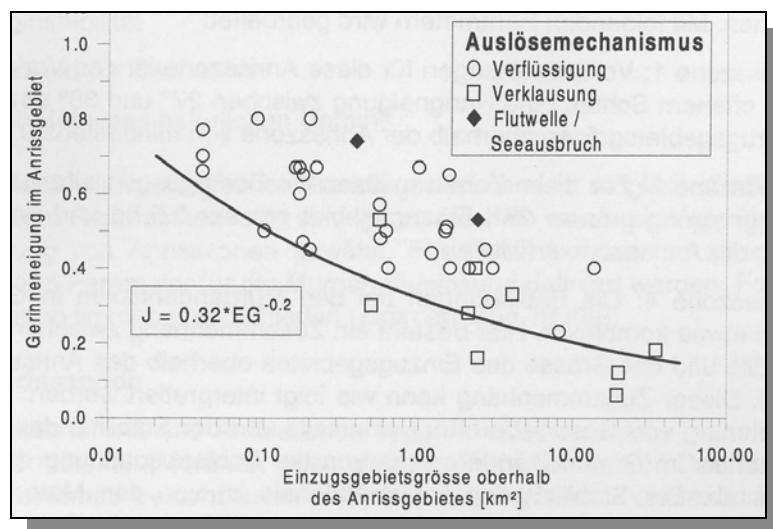


Abb. 8-4: Charakteristik von Gerinneanrissen bezüglich der Art der Auslösemechanismen (Zimmermann et al. 1997)

Die 74 Gerinneabschnitte mit Murgangauslösungen der Analysebäche in dieser Arbeit wurden entsprechend der Abb. 8-4 nach Zimmermann et al. (1997) in Abb. 8-5 dargestellt. Ein direkter Vergleich mit den Daten von Zimmermann et al. (1997) ist jedoch nicht möglich, da bei den Datengrundlagen der Gerinneneigung ein wesentlicher Unterschied besteht. Zimmermann et al. (1997) verwendeten zur Beschreibung der Gerinneneigung die Punktdaten des direkten Auslösepunktes des Murgangs. In der vorliegenden Arbeit sind die Daten zur Gerinneneigung jedoch nur auf Gerinneabschnitts-Ebene vorhanden. Die Auslösepunkte der Murgänge werden also durch generalisierte und pro Gerinneabschnitt gemittelte Werte der Gerinneneigung repräsentiert und nicht durch den konkreten Wert unmittelbar an Ort und Stelle der Auslösung. Geht man davon aus, dass die Längenprofile von Wildbachgerinnen grundsätzlich eine konkave Form haben, ist anzunehmen, dass die in dieser Arbeit verwendeten Gerinneneigungen im Vergleich zu den Punktinformationen von Zimmermann et al. (1997) kleinere Werte aufweisen.

Betrachtet man die Ergebnisse in Abb. 8-5, wird die obige Vermutung bestätigt. Die Werte der Gerinneneigung liegen auf einem tieferen Niveau als das Grenzgefälle nach Zimmermann et al. (1997) (graue Linie). Dennoch kann ein Zusammenhang zwischen der Einzugsgebietsfläche oberhalb der Anrisspunkte und der Gerinneneigung aufgezeigt werden. Im abflusslimitierten Bereich, also bei kleinen Einzugsgebietsflächen, ist für die Auslösung eines Murgangs eine grössere Gerinneneigung nötig als bei grösseren Einzugsgebietsflächen. Murgänge in flacheren Gerinneabschnitten können nur bei einem genügend grossen Abfluss, also einer genügend grossen Einzugsgebietsfläche gebildet werden. Eine weitere Parallele im Vergleich zu Zimmermann et al. (1997) ist bei den Murgangauslösungen durch Verkläuserungen (hellgrün und gelb) ersichtlich. Sowohl bei Zimmermann et al. (1997) als auch im Datensatz dieser Arbeit liegen die

Auslösestellen durch Verklausungen ab einer Einzugsgebietsgrösse $> 1 \text{ km}^2$ am unteren Rand der Punktwolke. Dies bedeutet, dass bei solch niedrigen Gerinneneigungen Murgangauslösungen nur noch durch Verklausungen möglich sind. Es gilt jedoch zu bemerken, dass sich grössere Verklausungen auch nur in flacheren Gerinneabschnitten bilden können, in denen ein genügender Rückhalteraum vorhanden ist.

Neben den vorgängig beschriebenen „Grossrutschungen“ und „Verklausungen“, haben keine anderen Negativfaktoren dazu geführt, dass sich ein Murgang bei speziellen Bedingungen bezüglich Einzugsgebietsfläche oberhalb A_{EG} oder Gerinneneigung J_{start} gebildet hat. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass das Grenzgefälle für die Bildung von Murgängen durch Negativfaktoren nicht beeinflusst werden kann. Das heisst, dass durch Negativfaktoren Murgänge nicht bei kleineren Gerinneneigungen ausgelöst werden als durch die klassischen Auslösemechanismen Sohlenverflüssigung und Fortsetzung aus dem Hang.

Im Hinblick auf das Geschiebeabschätzverfahren wurde auf der Basis von Zimmermann et al. (1997) eine eigene Formel zur Berechnung des Grenzgefälles J_{start} für die Bildung von Murgängen in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche oberhalb A_{EG} definiert. Sie wurde durch eine möglichst gute Annäherung an die erhobenen Felddaten gewählt und gibt das Grenzgefälle im Gegensatz zu Zimmermann et al. (1997) als mittlere Neigung eines Gerinneabschnitts an und nicht als Gerinneneigung direkt am Auslösepunkt. Sie lautet

$$J_{start} = 26 * A_{EG}^{-0.15}$$

J_{start} Mindest-Gefälle des Gerinneabschnitts für die Auslösung eines Murgangs [%]
 A_{EG} Einzugsgebietsfläche oberhalb der Gerinneabschnitts [km^2]

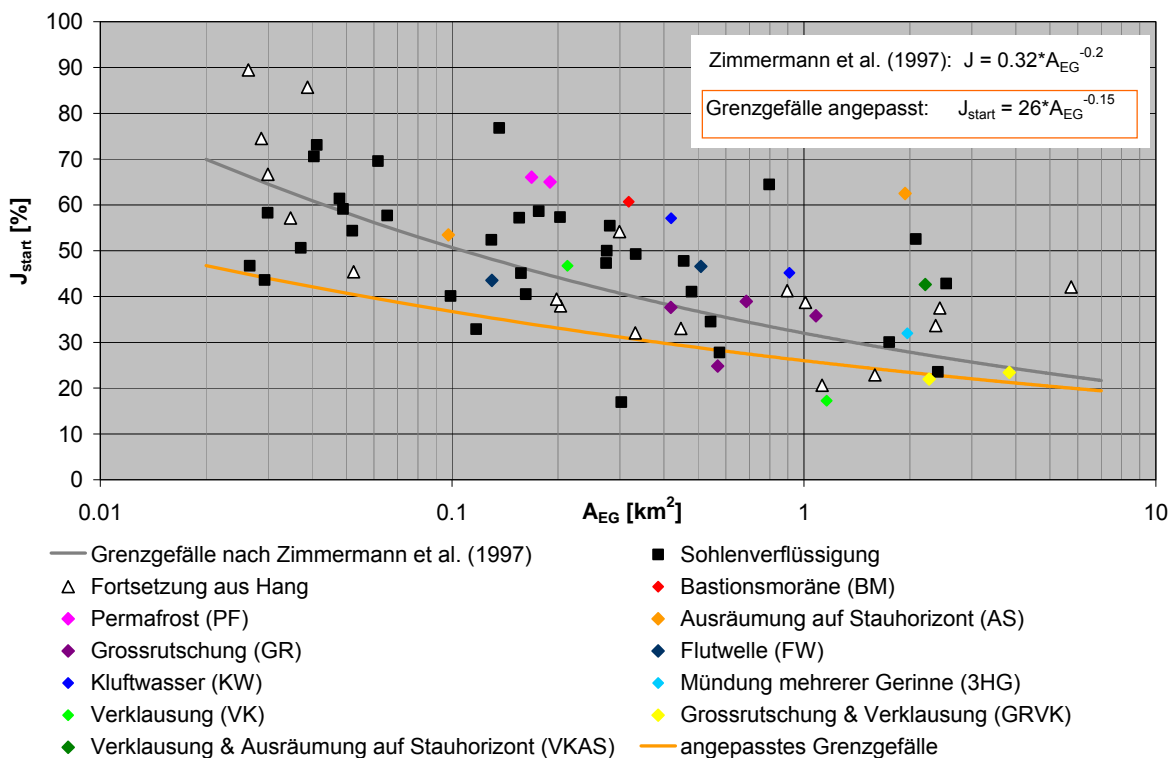


Abb. 8-5: Grenzgefälle J_{start} [%] zur Auslösung von Murgängen durch verschiedene Auslösemechanismen in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche oberhalb A_{EG} [km^2]

8.1.1.2 Erosionsleistungen durch Murgänge

Wie viel Geschiebe kann aus dem gerinnenahen Bereich bei Murgangtransport mobilisiert werden? Diese Frage ist eine der wichtigsten, wenn es darum geht, Geschiebeabschätzungen zu machen. Um diese Frage zu beantworten, wurden die 187 Gerinneabschnitte mit Erosion durch Murgangtransport analysiert.

Das oberste Diagramm in Abb. 8-6 gibt einen Überblick über die Häufigkeit der beobachteten Erosionsleistungen in den 187 Gerinneabschnitten mit Erosion durch Murgang. In den meisten Gerinneabschnitten wurde eine Erosionsleistung von 4-5 m³/m beobachtet. Die maximal beobachtete Erosionsleistung in einem Gerinneabschnitt war 252 m³/m im Rotlauibach (4-4) (vgl. Abb. 6-13). Lokal war hier die Erosionsleistung über 500 m³/m, im gesamten Gerinneabschnitt lag sie jedoch im Mittel bei rund 250 m³/m. Zu bemerken gilt es die sehr kleine Stichprobe von Gerinneabschnitten mit einer Erosionsleistung > 50 m³/m.

Das zweite Diagramm zum Lockermaterial-Angebot in Abb. 8-6 zeigt die relative Verteilung des Lockermaterialangebots pro Erosionsleistungsklasse. Dabei ist ein deutliches Muster zu erkennen. Gerinneabschnitte im limitierten Lockermaterial kommen nur bis zur Erosionsleistungsklasse 20-30 m³/m vor. Um grössere Erosionsleistungen zu erreichen, muss in einem Gerinneabschnitt ein unlimitiertes Lockermaterialangebot vorherrschen. Vereinfacht gesagt heisst dies: Wo nichts bereit liegt, kann auch nichts erodiert werden.

Bei der näheren Betrachtung des dritten Diagramms zu den Einzugsgebietsflächen oberhalb A_{EG} der untersuchten Gerinneabschnitte fällt auf, dass insbesondere bei kleinen Erosionsleistungen die Einzugsgebietsflächen oberhalb der Gerinneabschnitte auch eher kleiner waren. Ausser bei den ganz grossen Erosionsleistungsklassen > 70 m³/m, wo die Stichprobe sehr klein ist, nimmt der Anteil an Gerinneabschnitten mit grösserer Einzugsgebietsfläche oberhalb mit steigenden Erosionsleistungen stetig zu.

Bei der Gerinneneigung J_{GA} fällt im vierten Diagramm auf, dass in keinem Gerinneabschnitt mit einer Gerinneneigung < 10% Erosion durch Murgangtransport beobachtet wurde. Sowohl die ganz kleinen als auch die ganz grossen Erosionsleistungen wurden im sehr steilen Gebiet registriert, es müssen hier somit zusätzliche Einflussfaktoren relevant sein und die Erosionsleistung kann nicht alleine mit der Gerinneneigung erklärt werden.

Interessant ist die Verteilung der Negativfaktoren. Auf den ersten Blick fällt auf, dass ab einer Erosionsleistung > 20 m³/m der Anteil an Gerinneabschnitten, in welchen direkt (= im Gerinneabschnitt selber) oder indirekt (aufgrund von Auslösungen durch Negativfaktoren in oberhalb liegenden Gerinneabschnitten) Negativfaktoren vorkamen, markant ansteigt, und ab Erosionsleistungen > 70 m³/m alle Gerinneabschnitte direkt oder indirekt von Negativfaktoren betroffen waren. Allerdings ist in diesen Erosionsleistungsklassen die Stichprobe sehr klein und es kamen auch Negativfaktoren in Gerinneabschnitten mit kleineren Erosionsleistungen vor, welche es im Zusammenhang mit anderen Einflussfaktoren noch zu erklären gilt.

Beim Verhältnis J_{GA}/J_{GAob} können keine eindeutigen Muster erkannt werden. Beim $E-I_{akk}$ und der Einmündung von Seitengerinnen wird ersichtlich, dass bei kleinen Erosionsleistungsklassen der Anteil Erstabschnitte hoch ist und bei grösseren Erosionsleistungen bis ca. 30 m³/m der Anteil Gerinneabschnitte mit erhöhten $E-I_{akk}$ Werten und Einmündungen von Seitengerinnen zunimmt. Auch der Hanginput oberhalb und in den Gerinneabschnitten nimmt in diesem Bereich zu.

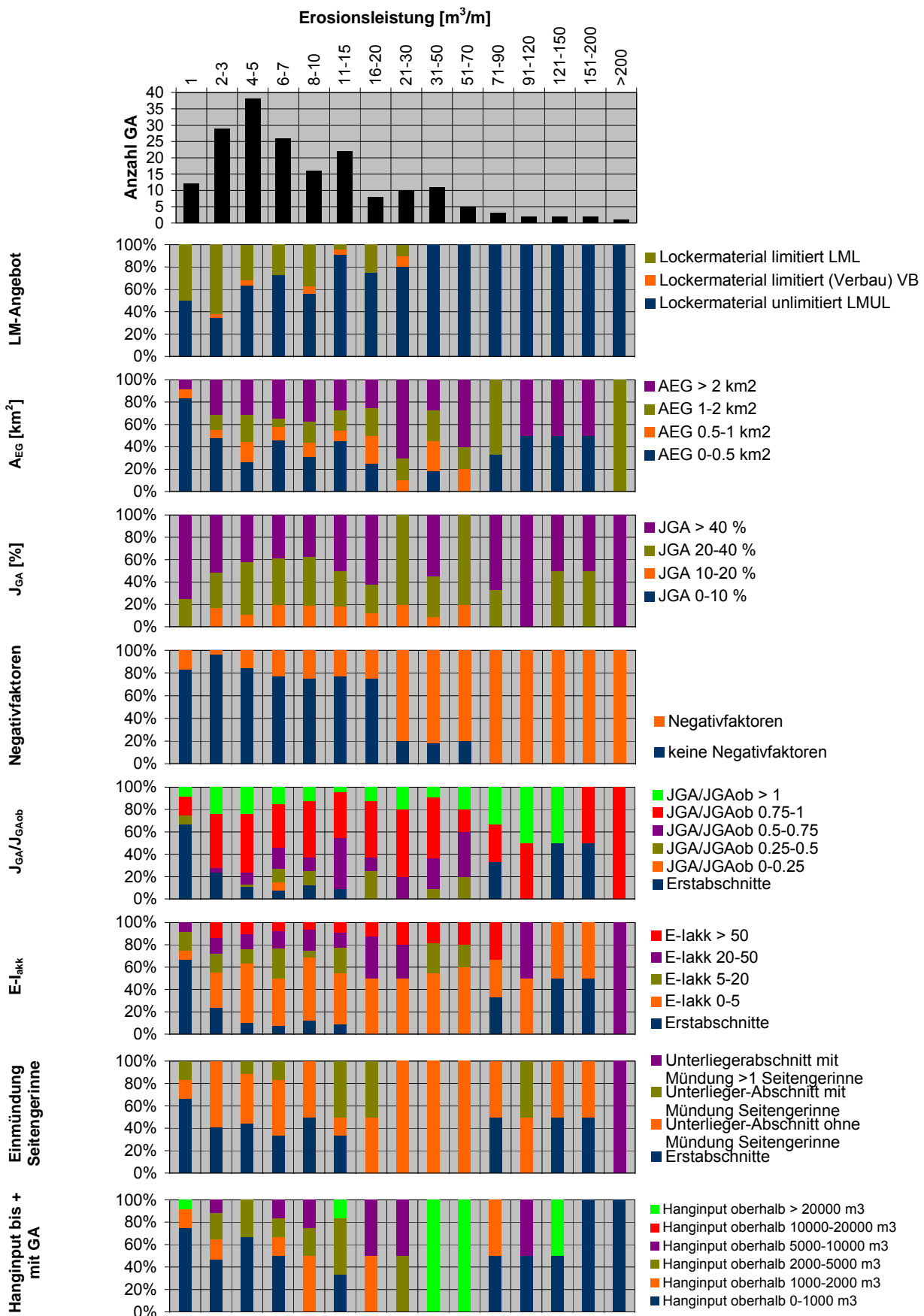


Abb. 8-6: Häufigkeitsverteilung verschiedener Einflussfaktoren an den Erosionsleistungsklassen der Gerinneabschnitte mit Gerinneerosion durch Murgangtransport

Nachdem in Abb. 8-6 die verschiedenen Einflussfaktoren aller Blickwinkel (lokale Standortfaktoren, Negativfaktoren, Bedingungen oberhalb) einzeln betrachtet wurden, soll nun versucht werden, deren kombiniertes Wirken auf die Erosionsleistung zu analysieren. Es stellt sich die Frage, bei welchen Einflussfaktor-Kombinationen grosse Erosionsleistungen, wann mittlere und wann kleine zu verzeichnen sind.

Grosse Erosionsleistungen > 20 m³/m durch Negativfaktoren

Bei der Betrachtung der Negativfaktoren in Abb. 8-6 wurde klar, dass diese für grosse Erosionsleistungen verantwortlich gemacht werden können. So waren mit wenigen Ausnahmen (Nant du Pissot (51-7 und 51-9), Tüfeltal (48-1), Chummerbach (17-7) und Holdenbach (49-9)) in allen Gerinneabschnitten mit Erosionsleistungen > 20 m³/m direkt im Gerinneabschnitt oder indirekt in oberhalb liegenden Gerinneabschnitten Negativfaktoren beobachtet worden. Aber es wurden auch Gerinneabschnitte beobachtet, die trotz direkter oder indirekter Beeinflussung durch Negativfaktoren kleine Erosionsleistungen gezeigt haben. In folgenden Analysen geht es nun darum, zu untersuchen, welche Gerinneabschnitte das Potenzial für sehr grosse Erosionsleistungen, verursacht durch Negativfaktoren haben und welche nicht und aus welchen Gründen nicht. Durch ein Ausschlussverfahren sollen dazu die relevanten Einflussfaktoren gefunden werden.

Als erster Grund, warum durch Negativfaktoren beeinflusste Gerinneabschnitte trotzdem kleine Erosionsleistungen aufweisen können, ist das Lockermaterialangebot zu nennen. Alle 57 Gerinneabschnitte mit direkter oder indirekter Beeinflussung durch Negativfaktoren wurden hinsichtlich des Lockermaterialangebots untersucht. Abb. 8-7 zeigt deutlich, dass für Erosionsleistungen > 30 m³/m neben den Negativfaktoren ein unlimitiertes Lockermaterialangebot vorliegen muss. Demgegenüber kann mit grosser Wahrscheinlichkeit bei allen 10 Gerinneabschnitten mit Erosionsleistung < 30 m³/m das fehlende Lockermaterial für ein Unterbinden der erosiven Wirkung der entsprechenden Negativfaktoren verantwortlich gemacht werden.

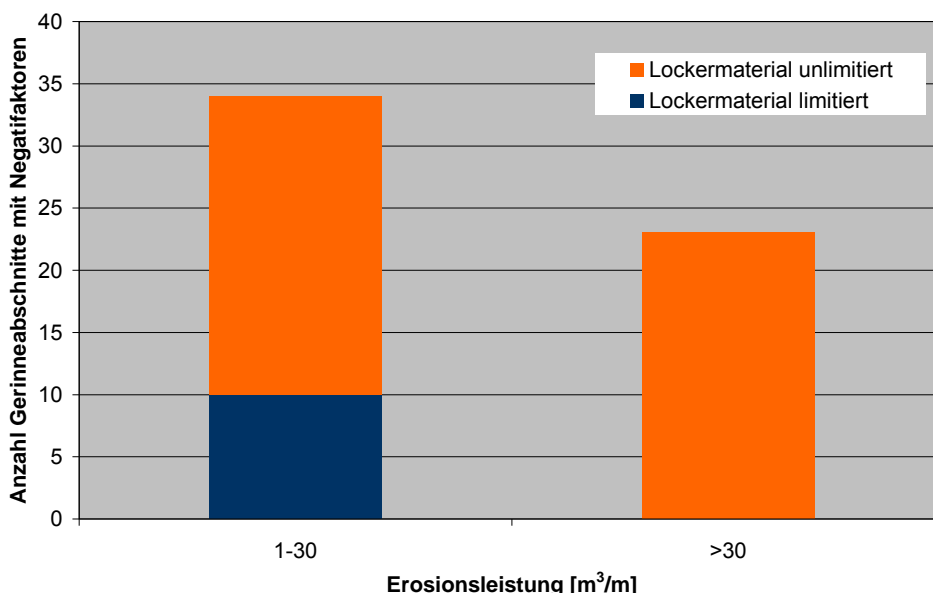


Abb. 8-7: Anzahl Gerinneabschnitte mit limitiertem oder unlimitiertem Lockermaterialangebot pro Erosionsleistungsklasse

Die 47 verbleibenden Gerinneabschnitte, welche direkt oder indirekt durch Negativfaktoren beeinflusst waren, wurden nun einzeln betrachtet. Es konnten verschiedene Gründe identifiziert werden, warum es sowohl zu grossen als auch zu kleinen Erosionsleistungen kommen kann:

Der erste Grund für kleinere Erosionsleistungen ist eine „Störung der Dynamik durch anthropogen bedingte Ablagerungen“. Beim Grossereignis im Lauibach (27) (Negativfaktor „Kluftwasser“ KW) wurden aufgrund von drei Forststrassen-Querungen über den Bach mit Durchlässen an drei Orten die Durchlässe hinterfüllt und es kam jeweils im Strassenbereich zu grossen Ablagerungen. Diese Mechanismen haben die Dynamik des Ereignisses stark verändert, weshalb die Daten der unterhalb liegenden Gerinneabschnitte zur Abschätzung des Einflusses natürlicher Einflussfaktoren nicht mehr weiter verwendet wurden. Es handelt sich dabei um die Gerinneabschnitte 27-5 (EL 1 m³/m), 27-7 (EL 5 m³/m), 27-3 (EL 7 m³/m).

Bei zwei Gerinneabschnitten im Minstigerbach (55-5 und 55-7) (Negativfaktor „Ausräumung auf Stauhorizont“) wurden zudem zwei weitere Hinweise für kleine Erosionsleistungen in indirekt von Negativfaktoren beeinflussten Gerinneabschnitten gefunden, die Einzugsgebietsgrösse und Zwischenablagerungen:

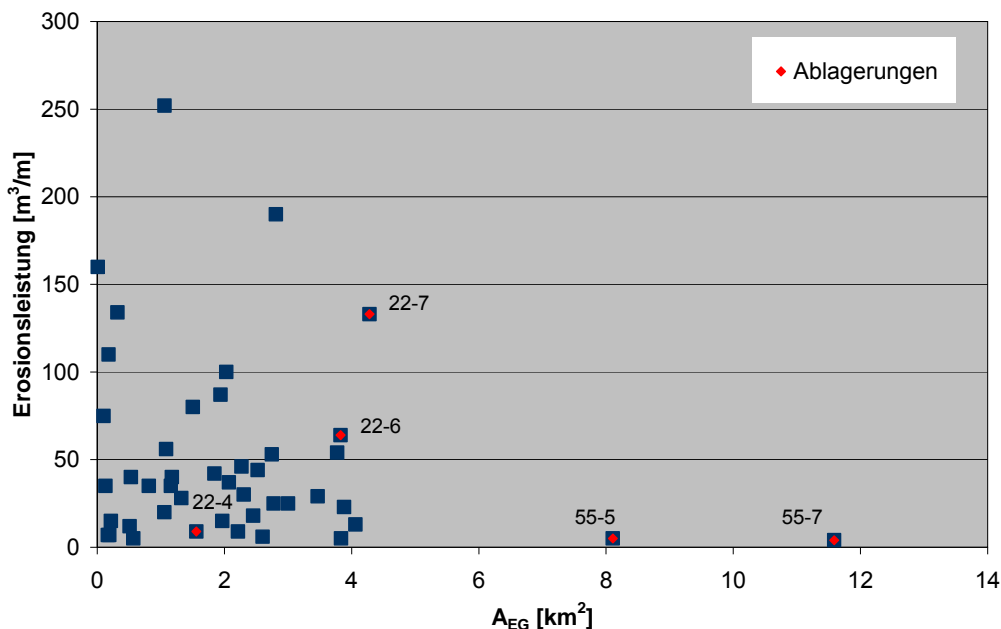


Abb. 8-8: Erosionsleistungen von durch Negativfaktoren beeinflussten Gerinneabschnitten in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche

Wie Abb. 8-8 zeigt, nimmt mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse, vermutlich verbunden mit abnehmender Gerinneneigung offenbar der Einfluss von oberhalb ausgelösten Negativfaktoren ab. Dadurch können auch die Erosionsleistungen kleiner werden. Zusätzlich haben oberhalb dieser Gerinneabschnitte im Minstigerbach auch Ablagerungen stattgefunden. Die Vermutung liegt somit nahe, dass durch diese Ablagerungen die Dynamik des aussergewöhnlichen Murganges im Minstigerbach etwas gedämpft werden konnte. Demgegenüber sind aber auch im Val Varuna (22-4, 22-6, 22-7) oberhalb von indirekt durch Negativfaktoren beeinflussten Gerinneabschnitten Ablagerungen vorgekommen, die Erosionsleistungen im Gerinneabschnitt unterhalb waren deshalb jedoch nicht unbedingt kleiner. Der einzige Unterschied zwischen dem Minstigerbach und dem Val Varuna besteht im Negativfaktor an sich. Im Minstigerbach war es der Negativfaktor „Ausräumung auf Stauhorizont“ (geschiebebeeinflussender Negativfaktor),

welcher im oberen Teil des Einzugsgebiets zur Bildung eines Murgangs geführt hat. Im Val Varuna war es der Negativfaktor „Verklauung“ (abflussbeeinflussender Negativfaktor). Der verstärkende Einfluss von Murgängen ausgelöst durch geschiebebeeinflussende Negativfaktoren (vgl. Kap. 6.3.1) auf unterhalb liegende Abschnitte wird vermutlich eher durch die gewaltigen mitgeführten Geschiebemengen und deren Erosionskraft in Form von „Masse“ bestimmt. Wird diese Masse teilweise oder ganz abgelagert, wird diese Erosionskraft verringert und kann in unterhalb liegenden Abschnitten nicht mehr in grossem Ausmass wirken. Bei den abflussbeeinflussenden Negativfaktoren (vgl. Kap. 6.3.2) ist die Wirkung auf unterhalb liegende Abschnitte weniger durch die Masse als durch den hohen Abfluss und die Geschwindigkeit dieses Abflusses gegeben. Dieser wird bei Zwischenablagerungen kurzfristig gebremst (22-4), die Abflussmenge bleibt jedoch grundsätzlich bestehen und kann in weiter unterhalb liegenden Gerinneabschnitten (22-6, 22-7) wiederum zu grosser Erosion führen.

Obige Überlegungen deuten darauf hin, dass weitere Erklärungen für die Unterscheidung von kleinen zu grossen Erosionsleistungen auch mittels den Einflussfaktoren Gerinneneigung und einzelnen Negativfaktoren bei direkter und indirekter Beeinflussung gesucht werden müssen. Dazu wurden in Abb. 8-9 die beobachteten Erosionsleistungen in Abhängigkeit von der Gerinneneigung sowie dem betreffenden Negativfaktor und seiner direkten oder indirekten Beeinflussung dargestellt.

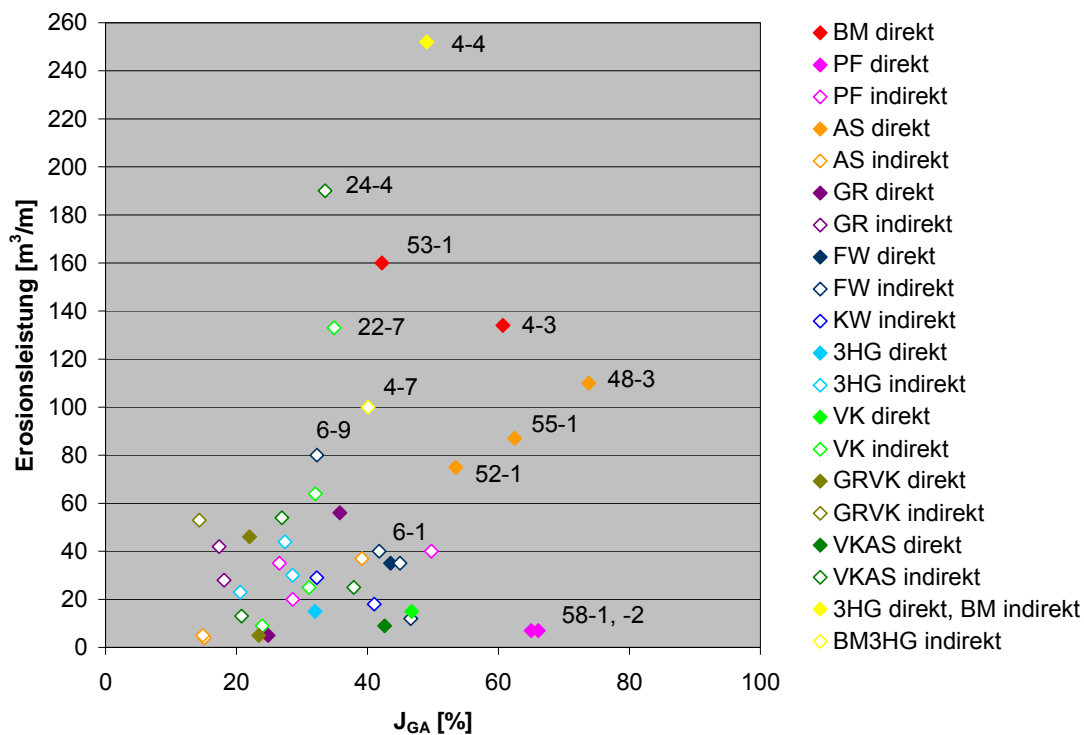


Abb. 8-9: Erosionsleistungen in durch verschiedenste Negativfaktoren direkt und indirekt beeinflussten Gerinneabschnitten in Abhängigkeit von der Gerinneneigung

Die in Abb. 8-9 dargestellten 44 Gerinneabschnitte, die direkt oder indirekt durch Negativfaktoren beeinflusst wurden, bilden eine kleine Stichprobe, zumal die einzelnen Negativfaktoren jeweils nur in einer kleinen Anzahl Wildbäche beobachtet wurden und praktisch jeder betrachtete Gerinneabschnitt ein Individuum ist. Trotzdem konnten wichtige Gemeinsamkeiten erkannt werden.

Betrachtet man den Einfluss der Gerinneneigung auf die Erosionsleistung, fällt auf, dass grosse Erosionsleistungen nur bei einer grossen Gerinneneigung stattgefunden haben. Für Erosionsleistungen $> 60 \text{ m}^3/\text{m}$ ist ein minimales Gefälle von rund 30% nötig.

Die mit Abstand grösste Erosionsleistung von $252 \text{ m}^3/\text{m}$ wurde im Rotlaubibach (4-4) durch die Kombination des direkten Negativfaktors „Mehrere Mündungen“ (3HG) und des indirekten Negativfaktors (ohne Zwischenablagerung) „Bastionsmoräne“ (BM) erreicht. Einem bereits sehr grossen, massigen Murgang, ausgelöst durch einen geschiebebeeinflussenden Negativfaktor, wurde durch mehrere Zuflüsse also zusätzlich viel Abfluss beigefügt, was, wie in Abb. 6-13 eindrücklich ersichtlich ist, zu enormen Erosionsleistungen und zu einer Eintiefung von bis zu 16 m geführt hat (vgl. auch Volumenbilanz in Abb. 3-2).

Auch die zweithöchste gemessene Erosionsleistung in der Plaunca (24-4) wurde wahrscheinlich durch die Kombination von zwei Negativfaktoren „Verklausung“ (VK) und „Ausräumung auf Stauhorizont“ (AS) erreicht, allerdings indirekt beeinflusst. Im Gegensatz dazu verzeichnete der Gerinneabschnitt, in dem die Kombination direkt auftrat eine verhältnismässig kleine Erosionsleistung von $9 \text{ m}^3/\text{m}$. Der Grund liegt bei der nur 2-3 m mächtigen Lockermaterialschicht, die auf einer undurchlässigeren Grundmoränenschicht mobilisiert wurde. Weiter unten war der Murgang aber anscheinend trotzdem fähig, enorme Erosionsleistungen zu erreichen.

Erosionsleistungswerte zwischen 70 und $160 \text{ m}^3/\text{m}$ wurden in 8 Gerinneabschnitten beobachtet. 2 Gerinneabschnitte sind dabei direkt betroffen durch den Negativfaktor „Bastionsmoräne“ (BM): Reuses du Dolent (53-1) und Rotlaubibach (4-3). 3 Gerinneabschnitte sind direkt betroffen durch den Negativfaktor „Ausräumung auf Stauhorizont“ (AS): Tüfeltaal (48-3), Minstigerbach (55-1) und Saxé (52-1). Hier war die Mächtigkeit der Lockermaterialauflage auf dem Gleithorizont aus Fels oder Lockermaterial bedeutend grösser als in der Plaunca, was lokal zu sehr hohen Erosionsleistungen führte. Die restlichen 3 Gerinneabschnitte wurden alle indirekt durch abflussbeeinflussende Negativfaktoren beeinflusst. Es handelt sich dabei um den Gerinneabschnitt im Val Varuna (22-7) durch „Verklausung“ (VK), dann um die beiden Gerinneabschnitte Rote Bach (6-9) durch eine „Flutwelle“ (FW) und Rotlaubibach (4-7) (vgl. Abb. 8-10) durch eine Kombination aus „Bastionsmoräne“ (BM) und „Mehrere Mündungen“ (3HG). Die beiden letzteren Gerinneabschnitte hatten beide einen erhöhten $E-I_{\text{akk}}$ von 57.9 (vgl. Kap. 6.2.3) resp. 38.3, welcher erklären könnte, dass die beiden Gerinneabschnitte trotz einer Gerinneneigung im unteren Bereich im Vergleich zu den anderen Gerinneabschnitten mit ähnlichen Erosionsleistungen trotzdem hohe Erosionsleistungen gezeigt haben. Der akkumulierte Energie-Index kann also auch einen Einfluss auf die Höhe der Erosionsleistung haben.



Abb. 8-10: Grosse Erosionsleistungen im Rotlaubibach (4-7) (Foto: Flotron AG)

Erosionsleistungen $< 70 \text{ m}^3/\text{m}$ kamen insbesondere in Gerinneabschnitten vor, die durch verschiedenste Negativfaktoren indirekt betroffen waren. Zudem gibt es in dieser Erosionsleitungsgruppe mehrere Gerinneabschnitte, welche direkt durch die Negativfaktoren „Permafrost“ (PF), „Flutwelle“ (FW), „Mehrere Mündungen“ (3HG), „Grossrutschungen“ (GR), mit oder ohne „Verkläusung“ (GRVK) oder reine „Verkläusungen“ (VK) beeinflusst wurden.

Der Negativfaktor „Permafrost“ (PF) wurde nur im Ritigraben (58) beobachtet. Im steilen Auslöungsgebiet (58-1 und 58-2) war in diesem Fall die Mächtigkeit der Auftauschicht relativ gering, weshalb die Erosionsleistung in den direkt betroffenen Gerinneabschnitten relativ klein blieb. In anderen Gebieten können diese mit Sicherheit grösser sein. Nichts desto trotz vermochte der dabei ausgelöste Murgang in weiter unten liegenden Gerinneabschnitten (58-4, 58-5, 58-6) indirekt zu grösseren Erosionsleistungen zu führen. Der Grund liegt wahrscheinlich darin, dass die Gerinnesohle dort durch die groben Blöcke von oben stark aufgerissen und destabilisiert worden ist.

Die Auslösung von Murgängen durch den Negativfaktor „Flutwelle“ findet nicht immer direkt an Ort und Stelle des Ausbruchs statt. Der Grund liegt darin, dass für die Stauung von Wasser ein relativ flaches Gelände mit genügend Rückhalteraum nötig ist. Im Rote Bach (6-1 direkt) lag diese Stauung unmittelbar vor einer Steilstrecke im unlimitierten Lockermaterial, während im Vadret da l'Alp Ota (21-3 indirekt) zuerst die Karschwelle überwunden werden musste und deshalb nicht direkt ein Murgang ausgelöst wurde. Die Erosionsleistungen hängen stark von der Abflussfracht der Flutwellen und der Dosierung resp. Zeitdauer der Hochwasserganglinie ab. Wichtig erscheint der Umstand, dass aufgrund der Niederschlags-Unabhängigkeit von Flutwellen nach dem einmaligen Durchfliessen kein grosser Abfluss mehr folgt. Durch Flutwellen werden somit selten mehrere Schübe von Murgängen ausgelöst, ausser wenn die Flutwellen selber in mehreren Schüben abfliessen. Dies könnte erklären, warum die Erosionsleistungen durch Flutwellen indirekt nur im mittleren Bereich liegen, ausser beim bereits erklärten Gerinneabschnitt im Rote Bach (6-9), welcher einen sehr hohen $E-I_{\text{akk}}$ Wert hatte und bei dem die Flutwelle innerhalb von nur 15 Minuten äusserst konzentriert abließ.

Der Negativfaktor „Mündung mehrerer Gerinne“ (3HG) wurde direkt im Val Valdun (23-5) beobachtet. Vermutlich können sich durch die rückschreitende Erosion an der Auslösestelle immer wieder neue Murschübe bilden, die in ihrer Gesamtheit weiter unten relativ viel Lockermaterial zu mobilisieren vermögen.

„Grossrutschungen“ (GR) können direkt im betroffenen Gerinneabschnitt zu grossen Erosionsleistungen führen, müssen aber nicht. Wenn die Rutschung während einem Ereignis permanent Geschiebe liefert und dadurch die Transportkapazität im Gerinne ständig ausgelastet ist, wird nicht viel Erosionskraft zur Gerinneerosion direkt im Gerinneabschnitt übrig bleiben. Spontane Abgänge mit Verkläusungen (GRVK) finden wiederum eher in flacheren Gerinneabschnitten statt, wo es überhaupt Rückhaltevolumen für eine Verkläusung gibt. Auch hier ist aber eher unterhalb der Verkläusungsstelle durch mehrere Murschübe mit grösseren Erosionsleistungen zu rechnen.

Der Negativfaktor „Kluftwasser“ (KW) brach in allen betreffenden Analyseebenen im limitierten Lockermaterial aus und führte aus diesem Grund direkt nie zu hohen Erosionsleistungen und erscheint wegen des limitierten Lockermaterialangebots nicht in der Grafik in Abb. 8-9. Weiter unten, beim Eintritt in Gerinneabschnitte mit unlimitiertem Lockermaterial konnte aber jeweils stärker erodiert werden, jedoch wurden keine Erosionsleistungen $> 40 \text{ m}^3/\text{m}$ beobachtet.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass grosse Erosionsleistungen durch Negativfaktoren erklärt werden können. Für die Gerinneabschnitte mit kleinen Erosionsleistungen und Negativfaktoren gibt es in den meisten Fällen plausible Erklärungen.

Grosse Erosionsleistungen > 20 m³/m ohne Negativfaktoren

Zu erklären gilt es nun noch die fünf Gerinneabschnitte, in welchen Erosionsleistungen > 20 m³/m beobachtet wurden, welche jedoch nicht durch Negativfaktoren beeinflusst waren (vgl. Tab. 8-2):

Tab. 8-2: Durch Negativfaktoren unbeeinflusste Gerinneabschnitte mit grossen Erosionsleistungen

Gerinneabschnitt	EL [m ³ /m]	Mögliche Erklärung für hohe Erosionsleistung
Nant du Pissot (51-7)	55	Gerinneabschnitt 51-7 ist die erste Strecke im unlimitierten Lockermaterial nach einem 0.731 km ² grossen, äusserst steilen Einzugsgebiet, in dem sich ein E-l _{akk} von 86.4 aufbauen konnte. Der Gerinneabschnitt selber ist mit 37% ebenfalls sehr steil und liegt zudem direkt unterhalb einer Felsstufe mit Wasserfall. Es ist wahrscheinlich, dass sich während dem Ereignis in diesem Gerinneabschnitt zusätzlich Kolkerosion unterhalb des Wasserfalls bilden konnte und darum eine solch grosse Erosionsleistung beobachtet wurde.
Tüfelthal (48-1)	44	Gerinneabschnitt 48-1 ist ebenfalls der oberste Gerinneabschnitt im unlimitierten Lockermaterial und mit 77 % Gerinneneigung ebenfalls äusserst steil. Oberhalb liegt eine Steilstrecke im anstehenden Fels, die in den Datengrundlagen nicht ausgeschieden wurde, da sie als Transitstrecke wirkte und erst ab Gerinneabschnitt 48-1 überhaupt Geschiebetransport stattfand. Diese Felsstrecke oberhalb hatte jedoch dieselbe Wirkung wie ein hoher E-l _{akk} gehabt hätte.
Nant du Pissot (51-9)	36	Der steile (40.4%) Gerinneabschnitt 51-9 liegt direkt unterhalb von Gerinneabschnitt 51-7, dessen Bedingungen oben in dieser Tabelle erklärt wurden. Kolkerosion gab es im Gerinneabschnitt 51-9 wohl nicht mehr, dafür mündete von der Seite ein bedeutendes Seitengerinne ein, das zusätzlichen Abfluss brachte. Die unausgelastete Transportkapazität in Form des hohen E-l _{akk} Wertes war auch in Gerinneabschnitt 51-9 noch vorhanden, wurde im Vergleich zu 51-7 durch die Einmündung des Felsgerinnes sogar noch zusätzlich erhöht mit 101.7.
Holdenbach (49-9) (vgl. Abb. 6-5)	29	Gerinneabschnitt 49-9 ist der unterste Gerinneabschnitt im Holdenbach. Mit einer Gerinneneigung von nur 15.9 % ist er im Vergleich zu den anderen Gerinneabschnitten relativ flach. Die zwei Teileinzugsgebiete mit je einer Fläche von 4 km ² und 1 km ² münden in diesem Gerinneabschnitt ineinander und beide haben freie Transportkapazität zur Verfügung, der E-l _{akk} beträgt 53. Trotz der geringen Gerinneneigung wird deshalb in Gerinneabschnitt 49-9 stark erodiert.
Chummerbach (17-7)	21	Gerinneabschnitt 17-7 ist der unterste Gerinneabschnitt im Chummerbach. Die Gerinneneigung beträgt gut 21 %. Besonders erosionsfördernde Einflussfaktoren wie beispielsweise ein erhöhter E-l _{akk} Wert oder die Einmündung eines bedeutenden Seitengerinnes sind nicht vorhanden. Die einzige mögliche Erklärung könnte sein, dass sich oberhalb eine Art Schluchtstrecke mit relativ engen Platzverhältnissen im Fels befindet. Da diese jedoch nicht steil ist (24.6%), wird dadurch der E-l _{akk} Wert nicht hoch (3.8). Es könnte aber sein, dass sich in dieser Strecke eine Art Kanalisierungs- oder Düseneffekt gebildet hat, der zu erhöhter Geschwindigkeit geführt hat, welche dann beim Eintritt in Gerinneabschnitt 17-7 zu verstärkter Erosion geführt hat. Dieser allfällige Effekt kann jedoch durch die in Kap. 6.2 definierten Einflussfaktoren nicht beschrieben werden.

Kleine (1-5 m³/m) und mittlere (5-20 m³/m) Erosionsleistungen

Wann werden in einem Gerinneabschnitt kleinere Erosionsleistungen verzeichnet, wann mittlere? Diese Frage soll durch die folgenden Analysen der Gerinneabschnitte mit Erosion durch Murgangtransport und beobachteten Erosionsleistungen im tiefen und mittleren Bereich analysiert werden. Dabei wurden die insgesamt 79 Gerinneabschnitte der Erosionsleistungsklassen 1-5 m³/m und 72 Gerinneabschnitte der Erosionsleistungsklassen 5-20 m³/m vergleichend ausgewertet.

Bei den lokalen Standortfaktoren ist das Lockermaterial ein relativ harter Einflussfaktor. Wenn es in einem Gerinneabschnitt kein oder nur eine limitierte Menge an Lockermaterial zur Verfügung hat, kann (aber muss nicht) genau soviel erodiert werden, bis der feste Fels ansteht. Im Falle von limitiertem Lockermaterialangebot sind somit der Erosionsleistung meistens Grenzen gesetzt, ausser die andern beiden lokalen Standortfaktoren Einzugsgebietsfläche und Gerinneigung sind so klein, dass entweder zu wenig Abfluss für eine komplette Ausräumung vorhanden ist oder das Gefälle zu klein ist und eher Ablagerungstendenz vorherrscht.

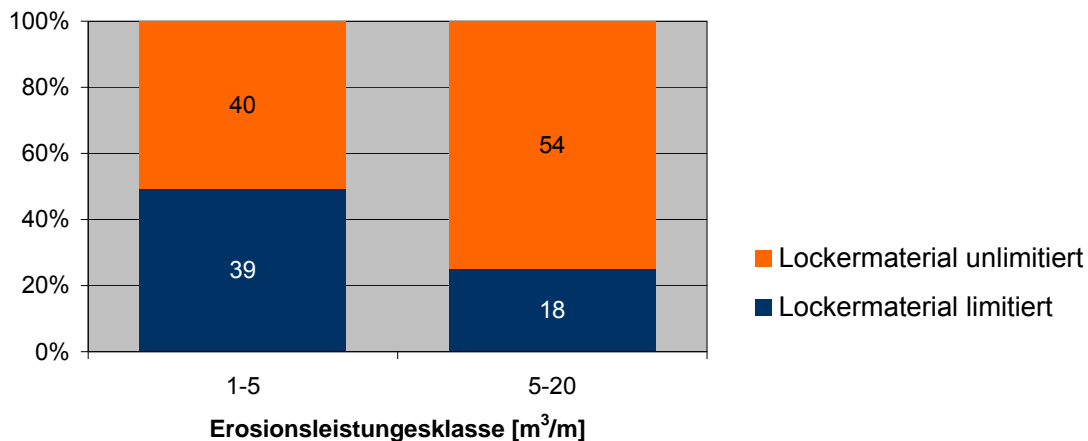


Abb. 8-11: Prozentualer Anteil und absolute Anzahl Gerinneabschnitte mit limitiertem und unlimitiertem Lockermaterialangebot pro Erosionsleistungsklasse

Abb. 8-11 zeigt, dass der Anteil an Gerinneabschnitten mit limitiertem Lockermaterial bei den Gerinneabschnitten der Erosionsleistungsklasse 1-5 m³/m bei 49% liegt, in der Klasse 5-20 m³/m bei 25%. Der Einfluss von anderen Einflussfaktoren ist in diesen Abschnitten mit limitiertem Lockermaterial teilweise oder ganz unterbunden, weshalb diese Gerinneabschnitte nicht weiter analysiert wurden.

Mit allen Gerinneabschnitten mit unlimitiertem Lockermaterial (40 in der Erosionsleistungsklasse 1-5 m³/m und 54 in der Erosionsleistungsklasse 5-20 m³/m) wurden nun Auswertungen zu weiteren Einflussfaktoren gemacht. Dabei wurden die beobachteten Erosionsleistungen einerseits mit der Einzugsgebietsfläche und andererseits mit der Gerinneigung verglichen, dies jeweils kombiniert mit den relevanten Parametern des Blickwinkels „Bedingungen oberhalb“.

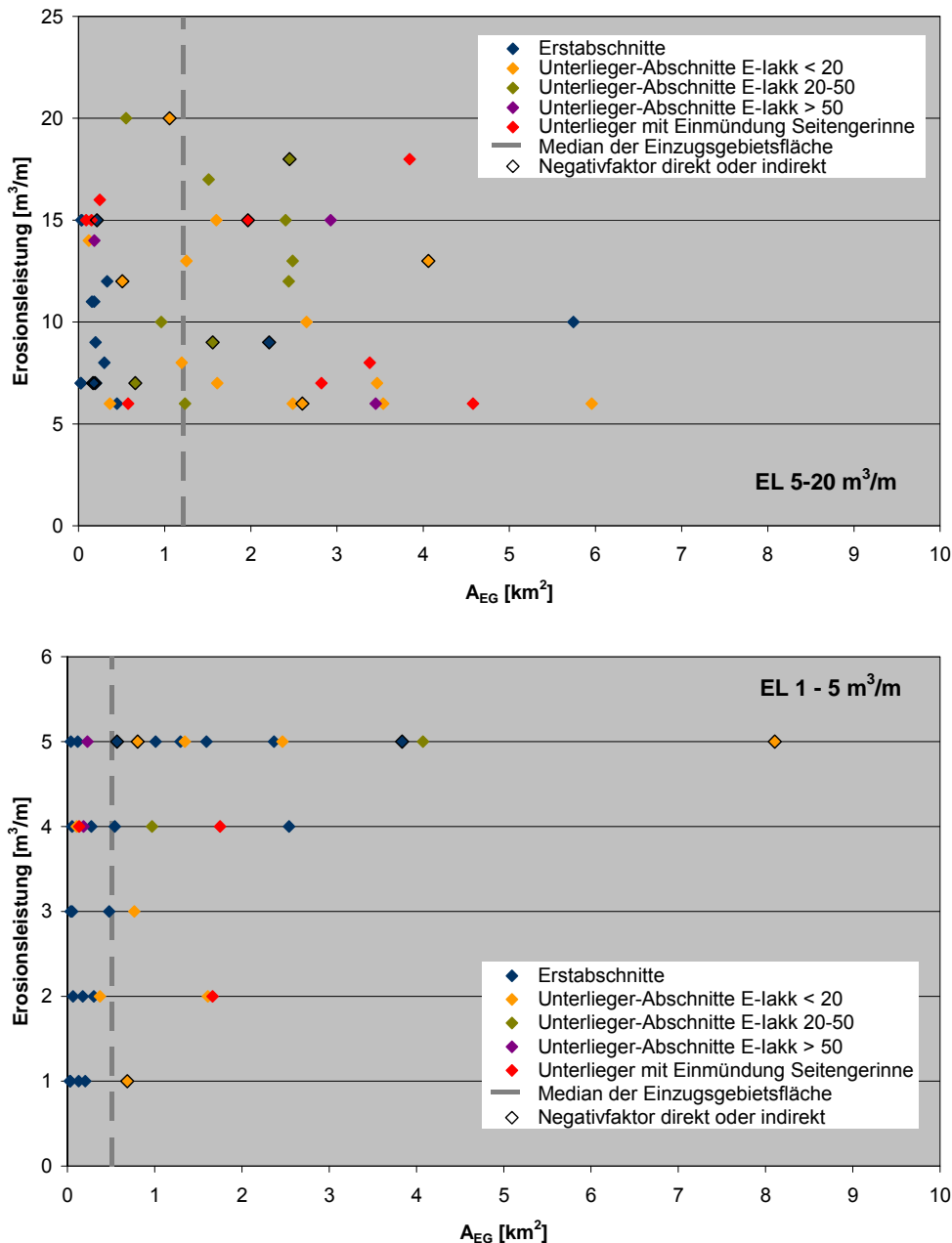


Abb. 8-12: Vergleich zwischen kleinen und mittleren Erosionsleistungen durch Murgangtransport in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche, akkumuliertem Energie-Index und Einmündungen bedeutender Seitengerinne

In Abb. 8-12 unten ist ersichtlich, dass die Gerinneabschnitte, welche sich in der Erosionsleistungsklasse 1-5 m³/m befinden, einerseits zu einem grossen Teil aus Erstabschnitten bestehen (blaue Punkte) und andererseits relativ kleine Einzugsgebietsflächen A_{EG} haben. Der Median der Einzugsgebietsflächen liegt bei rund 0.5 km². Demgegenüber liegt der Median der Einzugsgebietsfläche bei den Gerinneabschnitten mit Erosionsleistungen 5-20 m³/m (Abb. 8-12 oben) deutlich höher bei rund 1.2 km². Auch der Anteil Erstabschnitte ist in dieser Klasse kleiner.

Beim Vergleich der Unterlieger-Abschnitte fällt auf, dass bei Gerinneabschnitten der Erosionsleistungsklasse 1-5 m³/m die meisten relativ kleine Werte des E-I_{akk} haben und nur wenige grössere Werte vorkommen. Je grösser die Werte des E-I_{akk}, umso grösser waren auch die Erosionsleistungen. Werte des E-I_{akk} > 20 haben immer zu Erosionsleistungen > 3 m³/m geführt.

Auch bei Einmündungen von bedeutenden Seitengerinnen sind die Erosionsleistungen eher am oberen Klassenrand im Bereich von 4-5 m³/m zu finden. Bei den Gerinneabschnitten der Erosionsleistungsklasse 5-20 m³/m ist dies ähnlich. Insbesondere bei grösseren Einzugsgebietsflächen haben Gerinneabschnitte mit höheren $E-I_{akk}$ Werten grössere Erosionsleistungen gezeigt als bei gleich grossen Einzugsgebietsflächen, aber tieferen $E-I_{akk}$ Werten. Der Anteil an Gerinneabschnitten mit $E-I_{akk}$ Werten > 20 oder sogar > 50 ist allgemein im Vergleich zu der Erosionsleistungsklasse 1-5 m³/m deutlich höher. Es kommen auch mehr Gerinneabschnitte vor, die eine Einmündung bedeutender Seitengerinne zu verzeichnen haben. Abb. 8-13 zeigt diese Erklärungen zusammenfassend in einem Vergleich zwischen den beiden Erosionsleistungsklassen 1-5 m³/m und 5-20 m³/m.

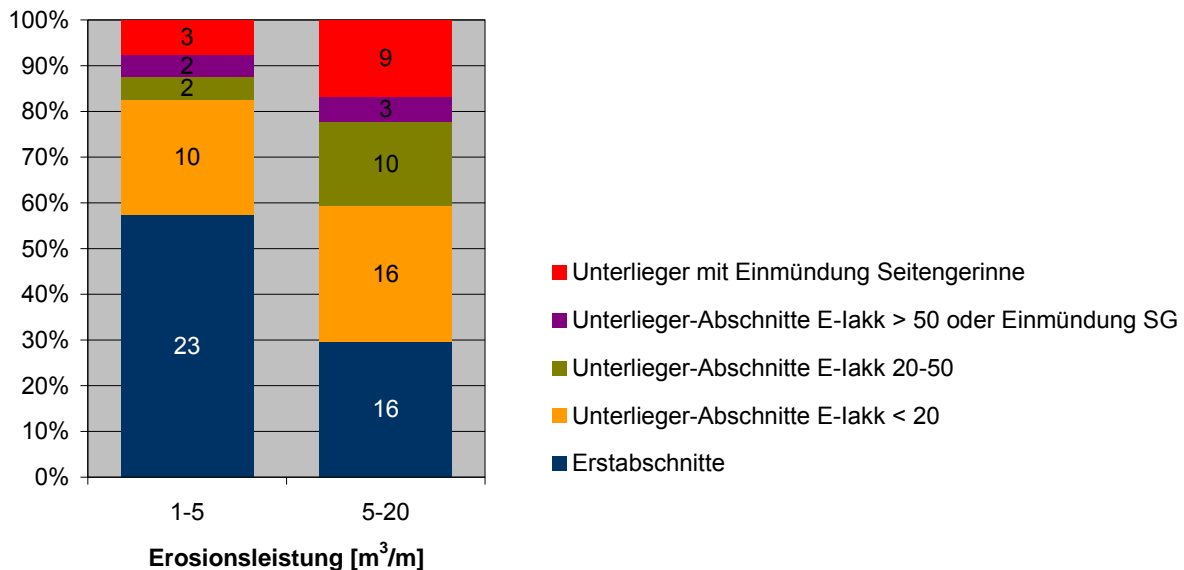


Abb. 8-13: Prozentualer Anteile und absolute Anzahl der Gerinneabschnitte der Erosionsleistungsklassen 1-5 m³/m resp. 5-20 m³/m in Abhängigkeit vom $E-I_{akk}$ oder von Einmündungen bedeutender Seitengerinne

Beim Vergleich der Erosionsleistungen in Abhängigkeit von den Einflussfaktoren der „Bedingungen oberhalb“ ($E-I_{akk}$ und Einmündung Seitengerinne) und von der Gerinneneigung (vgl. Abb. 8-14) ist ersichtlich, dass die Zugehörigkeit zur kleinen oder mittleren Erosionsleistungsklasse nicht mit der Gerinneneigung alleine erklärt werden kann. Man kann nicht sagen, dass die Werte der Gerinneneigung in der Erosionsleistungsklasse 5-20 m³/m grösser wären als in der Erosionsleistungsklasse 1-5 m³/m. Jedoch kann gesagt werden, dass bei ähnlicher Gerinneneigung innerhalb der einzelnen Klassen diejenigen Gerinneabschnitte mit erhöhten $E-I_{akk}$ Werten eher am oberen Rand der Klasse liegen als diejenigen Gerinneabschnitte mit kleineren $E-I_{akk}$ Werten. Ebenfalls ersichtlich ist, dass die Erstabschnitte im Mittel deutlich steiler sind als Unterlieger-Abschnitte, was angesichts der Geometrie von Wildbacheinzugsgebieten nicht weiter erstaunt.

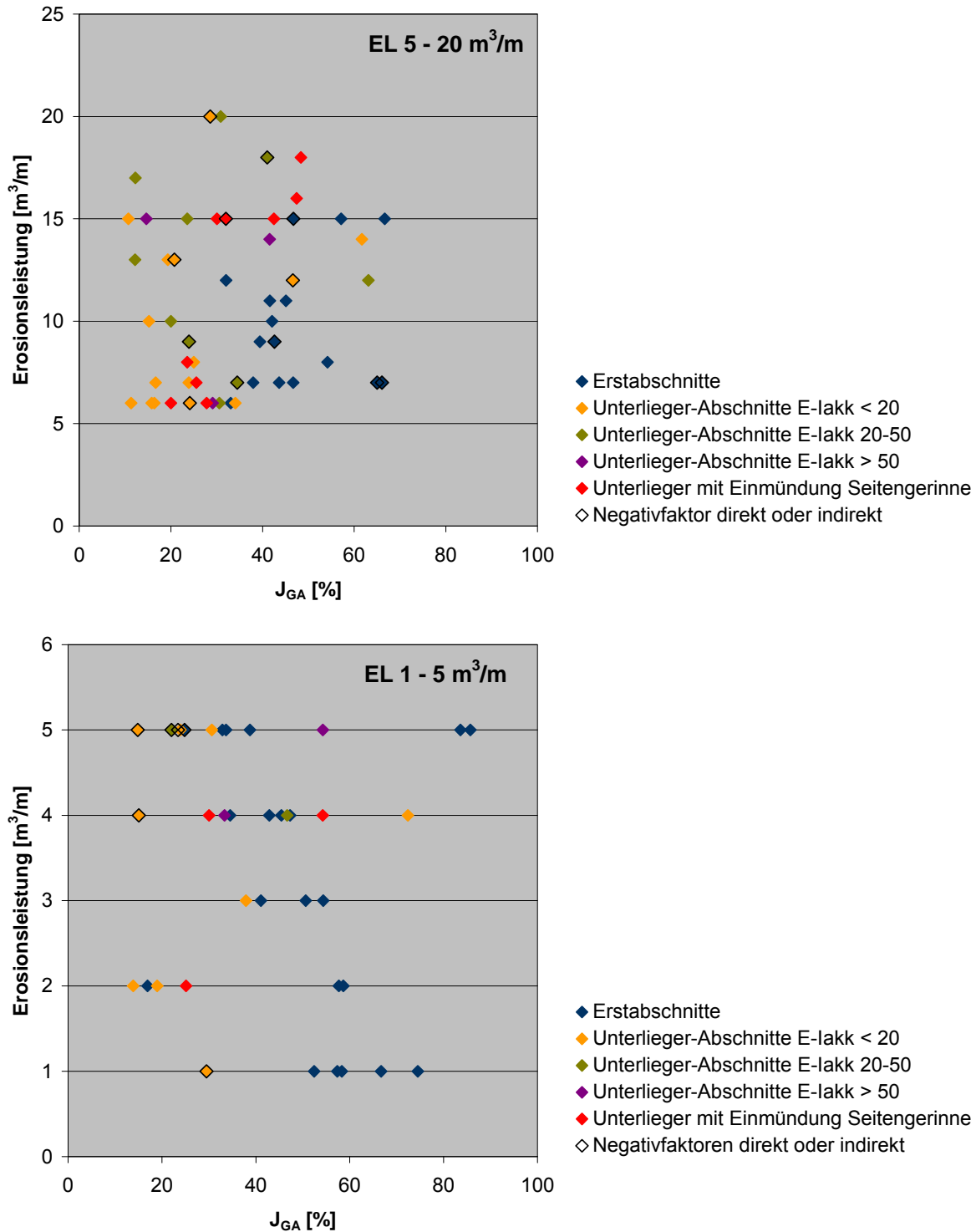


Abb. 8-14: Vergleich zwischen kleinen und mittleren Erosionsleistungen durch Murgangtransport in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche, akkumuliertem Energie-Index und Einmündungen bedeutender Seitengerinne

Bei obigen Auswertungen wurde vor allem die Wichtigkeit der Einflussfaktoren des Blickwinkels „Bedingungen oberhalb“ unterstrichen. In Erstabschnitten können die unterschiedlich grossen Erosionsleistungen jedoch nicht durch die beiden Einflussfaktoren $E-I_{akk}$ und Einmündung von Seitengerinnen erklärt werden, da der Blickwinkel „Bedingungen oberhalb“ bei Erstabschnitten gar nicht berücksichtigt werden kann.

Hier sind laut definierter Systemtheorie in Kap. 5.4.4 nur die Einflussfaktoren der drei lokalen Standortfaktoren relevant. Die Erstabschnitte im unlimitierten Lockermaterial wurden somit zusätzlich hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Gerinneneigung und Einzugsgebietsfläche untersucht.

In Abb. 8-15 ist ersichtlich, dass in Erstabschnitten in denen eine Erosionsleistung $> 5 \text{ m}^3/\text{m}$ gemessen wurde, immer eine Gerinneneigung $> 30\%$ vorlag. Man kann also sagen, dass Erstabschnitte eine grosse Gerinneneigung benötigen, um Erosionsleistungen zwischen 5 und 20 m^3/m zu erreichen.

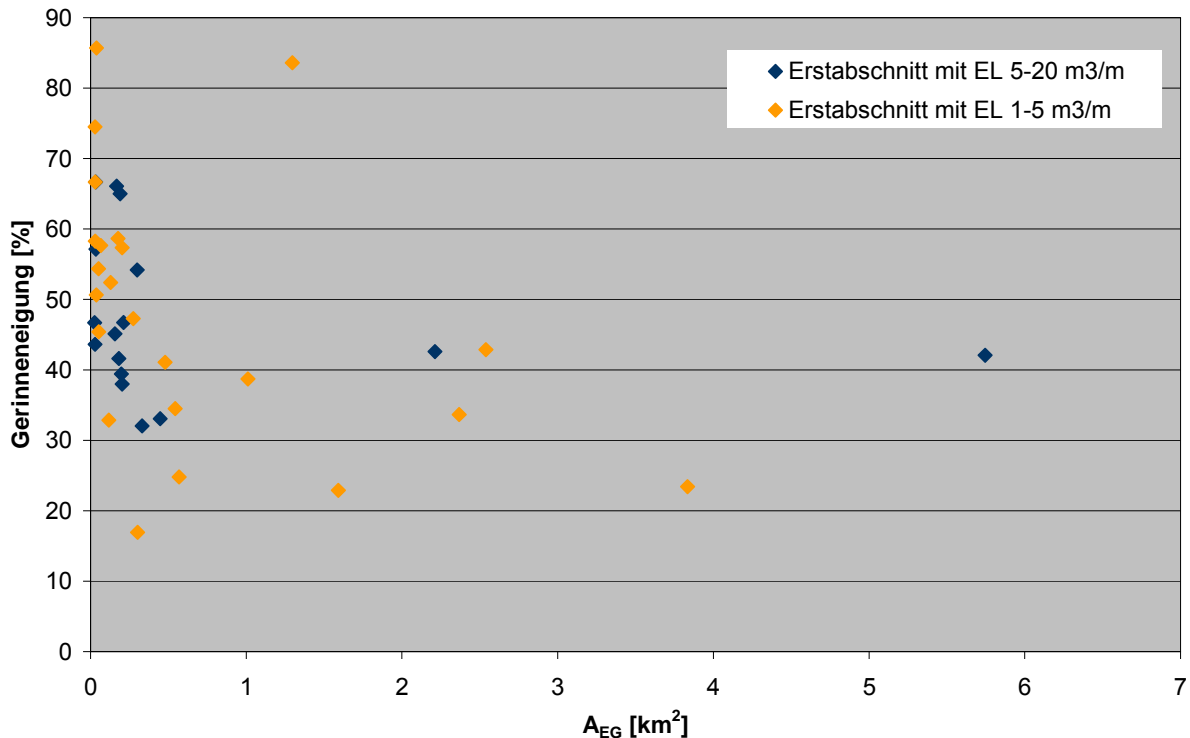


Abb. 8-15: Erosionsleistung in Erstabschnitten in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung

Fazit und Verallgemeinerung

Als Fazit kann verallgemeinernd festgehalten werden:

Extreme Erosionsleistungen im Bereich von $200 \text{ m}^3/\text{m}$ und grösser sind praktisch nur durch die Kombination von mindestens zwei Negativfaktoren bei Gerinneneigungen von $> 40\%$ möglich.

Sehr grosse Erosionsleistungen im Bereich von 70 bis $200 \text{ m}^3/\text{m}$ sind praktisch nur in Gerinneabschnitten möglich, die:

- eine Mindestneigung von 40% haben
- die entweder direkt durch Negativfaktoren der Kategorie geschiebebeeinflussende Negativfaktoren beeinflusst werden
- oder die indirekt durch Negativfaktoren (geschiebebeeinflussend oder abflussbeeinflussend) beeinflusst werden und die Erosionsleistung zusätzlich verstärkt wird durch grosse akkumulierte Energie-Indizes.

Grosse Erosionsleistungen im Bereich von 20-70 m³/m sind wahrscheinlich:

- bei einer Gerinnenneigung > 10 %
- in Gerinneabschnitten, die direkt durch abflussbeeinflussende Negativfaktoren, direkt durch Grossrutschungen oder direkt durch geschiebebeeinflussende Negativfaktoren mit einer leicht begrenzten Lockermaterialauflage beeinflusst werden.
- in Gerinneabschnitten, die indirekt durch alle Negativfaktoren beeinflusst werden, wenn sie keine zusätzlichen erosionsverstärkende Faktoren zu verzeichnen haben.
- in Einzelfällen in Gerinneabschnitten, die nicht durch Negativfaktoren beeinflusst sind. Dies jedoch nur, wenn sie sehr steil sind, stark erosionsfördernde Faktoren wie hohe $E-I_{akk}$ Werte besitzen oder Einmündungen bedeutender Seitengerinne mit sehr grossen Einzugsgebietsflächen haben.

Mittlere Erosionsleistungen im Bereich von 5-20 m³/m sind üblich in:

- Gerinneabschnitten >10% Gerinnenneigung
- Gerinneabschnitten, die entweder direkt durch geschiebebeeinflussende Negativfaktoren beeinflusst werden, in denen auf dem Stauhorizont eine äusserst begrenzte Lockermaterialauflast liegt
- oder in Gerinneabschnitten, welche direkt durch abflussbeeinflussende Negativfaktoren beeinflusst werden.
- Unterlieger-Gerinneabschnitte ohne Beeinflussung durch Negativfaktoren bei Einzugsgebietsflächen > 0.5 km² und bei erhöhten $E-I_{akk}$ Werten.
- Erstabschnitten, wenn sie eine Minimalneigung von 30% haben.

Kleine Erosionsleistungen im Bereich von 1-5 m³/m sind üblich in Erstabschnitten mit Einzugsgebietsflächen <1 km² und in Unterlieger-Abschnitten mit limitiertem Lockermaterial.

8.1.2 Geschiebeumlagerung und -ablagerung

Auf Flachstrecken im Mittellauf von Wildbächen stellt sich bei Gefahrenbeurteilungen die Frage, ob allenfalls mittransportiertes Geschiebe abgelagert wird und wenn ja, wie viel. Bei Murgängen stellt sich zusätzlich die Frage, ob ein Murgang gestoppt wird oder ob er nur gewisse Anteile des mitgeführten Lockermaterials ablagert, der Murgang als solches aber bestehen bleibt und das restliche Geschiebe mittels Murgangverlagerung weitertransportiert wird.

Ablagerungen treten normalerweise in Situationen ein, wo sich das Gerinnegefälle stark verringert und sich die Gerinnesohle stark verbreitert (vgl. Abb. 8-16). Da durch die digitalen Grundlagedaten keine Angaben zur Gerinnebreite vorhanden waren, wurden nur Gefällsreduktionen berücksichtigt, welche durch den Einflussfaktor J_{GA}/J_{GAob} beschrieben werden (vgl. Kap. 6.2.2).

In einem ersten Schritt wurden sämtliche Unterlieger-Abschnitte mit Murgangtransport sowie diejenigen Gerinneabschnitte, welche zu einem Murgangstop geführt haben hinsichtlich ihrer mittleren Gerinnenneigung und dem Verhältnis J_{GA}/J_{GAob} ausgewertet (vgl. Abb. 8-17). Die Gerinneabschnitte mit Ablagerungen oder mit einem Murgangstop lassen sich relativ gut durch die beiden Einflussfaktoren J_{GA} und J_{GA}/J_{GAob} eingrenzen. Dazu wurden die Ablagerungsarten noch unterschieden nach verschiedenen Ursachen. Ablagerungen in Geschiebesammlern, hinter Furten oder Strassendurchlässen werden durch die Faktoren J_{GA} und J_{GA}/J_{GAob} nur unzureichend beschrieben, da bei diesen generalisierten Grössen solch lokale Phänomene nicht er-

sichtlich werden. Auch Sperrentreppen werden durch ihr abgetrepptes Längenprofil durch die mittlere Gerinneneigung des Gerinneabschnitts nur unzureichend beschrieben. Aus diesem Grund werden in der Folge nur diejenigen Gerinneabschnitte betrachtet, in welchen Ablagerungen in „ungestörter“ Weise, also rein aufgrund natürlicher Gelände-Verflachungen abgelaufen sind.



Abb. 8-16: Murgangablagerungen im Minstigerbach (55) und (77)

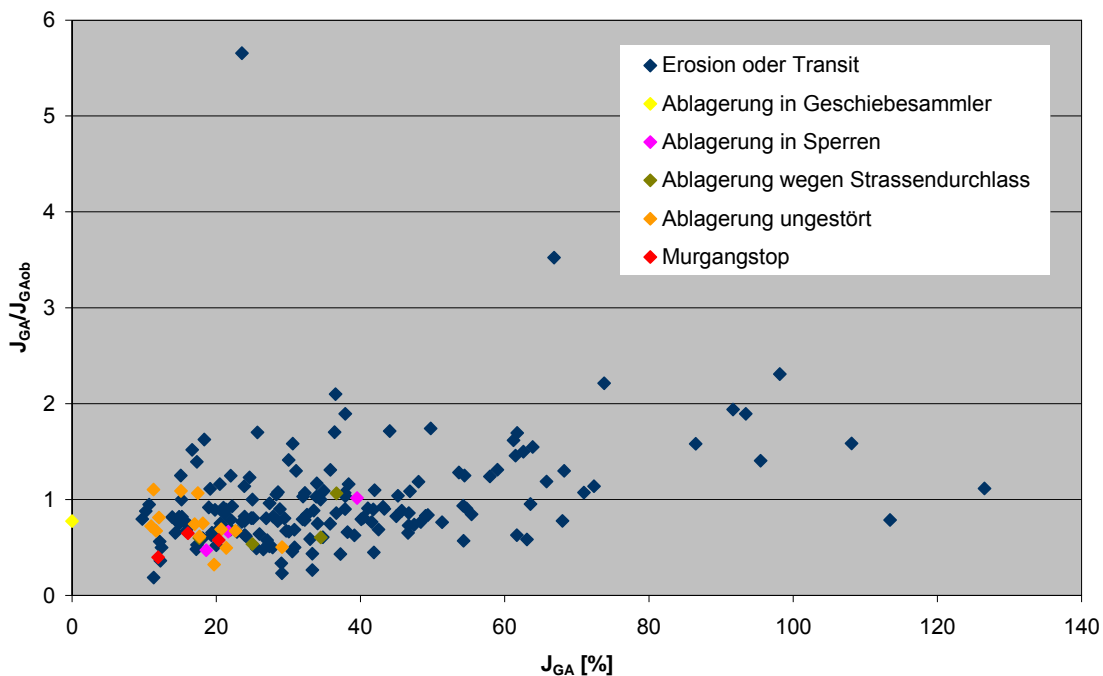


Abb. 8-17: Funktion der Unterlieger-Abschnitte mit Murgangtransport oder Murgangstop in Abhängigkeit von der mittleren Gerinneneigung J_{GA} und dem Verhältnis J_{GA}/J_{GAob}

In Abb. 8-18 wurde der Bereich mit „ungestörten“ Ablagerungen aus Abb. 8-17 eingezoomt und zusätzlich in Abhängigkeit des Ablagerungsfaktors gestellt. Der Ablagerungsfaktor ist das Verhältnis von der im Gerinneabschnitt abgelagerten Kubatur oder der Geschiebebilanz im Gerinne-

neabschnitt (GB_{GA}) zu der Geschiebefracht, die in den Gerinneabschnitt transportiert wurde (GF_{GAob}). Ein Ablagerungsfaktor von 0.5 bedeutet somit, dass 50% der bis zum betreffenden Gerinneabschnitt transportierten Geschiebefracht im Gerinneabschnitt abgelagert wurden.

Rein theoretisch ist davon auszugehen, dass je flacher ein Gerinneabschnitt ist (J_{GA}) und je stärker die Verflachung gegenüber seinem Oberlieger-Abschnitt ist (J_{GA}/J_{GAob}), umso mehr mitgeführtes Lockermaterial abgelagert wird und umso eher ein Murgang gestoppt wird. Diese Tendenz lässt sich mit Hilfe von Abb. 8-18 bestätigen. Die Gerinneabschnitte mit grossen Ablagerungsfaktoren liegen mit einer Ausnahme im unteren Bereich der Werte J_{GA} und J_{GA}/J_{GAob} . Demgegenüber kommen Gerinneabschnitte mit kleineren Ablagerungsfaktoren eher im Bereich von steileren Bedingungen vor, wo eine weniger grosse Verflachung stattgefunden hat. Auch die drei Gerinneabschnitte, in denen ein Murgang gestoppt wurde (Sandbach (2-4), Schwarzbächli (5-2) und Ri di Bedretto (40-3)), befinden sich im Bereich von geringen Gerinneneigungen und starken Verflachungen.

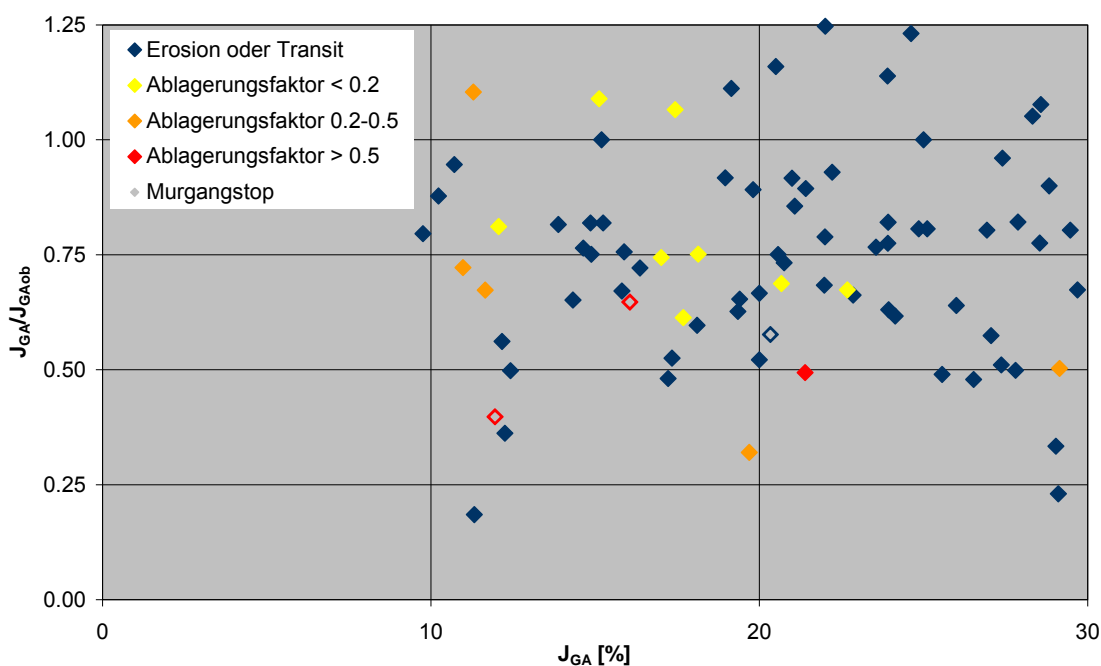


Abb. 8-18: Detaillierte Ansicht der Funktion der Gerinneabschnitte mit Murgangtransport in Abhängigkeit von der Gerinneneigung im Gerinneabschnitte (J_{GA}) und dem Verhältnis zu jener im oberen Gerinneabschnitt (J_{GA}/J_{GAob})

Es kann somit gesagt werden, dass Gerinneabschnitte mit einer Gerinneneigung zwischen 0-20% sowie Gerinneabschnitte mit einer Gerinneneigung von 20-30% und einer zusätzlichen Verflachung von J_{GA}/J_{GAob} von < 0.75 grundsätzlich das Potenzial für Ablagerungen haben. Je kleiner dabei die Gerinneneigung ist und je stärker die Verflachung, mit umso mehr Ablagerung ist zu rechnen. Neben diesen Gerinneabschnitten mit Ablagerung gibt es aber auch sehr viele Gerinneabschnitte, die bei gleichen Bedingungen Erosionsprozesse gezeigt haben. Für eine nähere Betrachtung wurden alle Gerinneabschnitte mit einer Gerinneneigung $< 15\%$ oder einem Verhältnis $J_{GA}/J_{GAob} < 0.5$ ausgewählt (vgl. Tab. 8-3), um allfällige Muster zu suchen. Die Suche nach Gründen für oder gegen Ablagerungen bei gleichen Voraussetzungen betreffend der Gerinneneigung und Verflachung gestaltet sich jedoch sehr schwierig. Der Umgang mit Gerinneabschnitten im Grenzbereich zwischen Erosion und Ablagerung, sog. Umlagerungstrecken ist ganz allgemein nicht einfach und es können einzig Tendenzen aus Einzelfällen herausgelesen werden:

Tab. 8-3: Kennzahlen der Gerinneabschnitte $J_{GA} < 15\%$ resp. $J_{GA} 15-30\%$ und $J_{GA}/J_{GAob} < 0.5$ mit Geschiebetrieb

	Gerinneabschnitt	Ablagerungsfaktor Anteil der abgelagerten Geschiebefracht	Erosionsleistung	J_{GA}	J_{GA}/J_{GAob}	Hangingput bis + mit GA < 5000 m ³	Hangingput bis + mit GA 5'000-20'000 m ³	Hangingput (NF GR) > 20'000 m ³	NF BM, PF, AS, GR ohne VK	NF GR mit VK	E-l _{akk} 20-50	E-l _{akk} >50	Wasserfall direkt oberhalb	Einmündung bedeutendes SG
J _{GA} < 15%	Schwendibach (3-4)		6	11.3	0.18		x						x	
	Schwenditobel (19-3)		17	12.3	0.36	x					x			
	Sandbach (2-4)	0.53		11.9	0.40									
	Schwenditobel (19-6)		0 (T)	12.4	0.50	x						x		x
	Edisriederbach (37-4)		13	12.2	0.56			x			x			
	Haldibach (29-3)		53	14.3	0.65			x		x				
	Schwenditobel (19-8)	0.34		11.7	0.67	x						x		
	Milibach (14-11)	0.36		11.0	0.72	x								
	Schwenditobel (19-4)		0 (T)	9.8	0.80	x					x			
	Minstigerbach (55-6)	0.11		12.1	0.81				x					
	Val Gronda (26-4)		2	13.9	0.82									
	Schwenditobel (19-9)		3	10.2	0.88	x						x		
	J _{GA} 15-30%; J _{GA} /J _{GAob} < 0.5	Schwendibach (3-5)		15	10.7	0.95		x						
Schwenditobel (19-10)		0.34		11.3	1.10	x						x		
Dorfbach (54-7)			6	29.1	0.23							x	x	
Reuses du Dolent (53-3)		0.42		19.7	0.32				x			x	x	x
Gangbach (49-5)			1	29.0	0.33			x		x				x
Ritigraben (58-4)			35	26.5	0.48				x			x		
Dorfbach (36-5)			10	17.2	0.48	x						x		
Ri di Ronco (43-11)			7	25.6	0.49	x						x		x
Ri di Ronco (43-4)		0.77		21.4	0.49							x		
Mehlbach (31-9)			6	27.8	0.50									x
Val Varuna (22-3)	0.45		29.1	0.50					x	x		x		

- Gerinneabschnitte, welche in oberhalb liegenden Gerinneabschnitten geschiebebeeinflussende Negativfaktoren mit sehr grossem Input hatten, tendieren in Gerinneabschnitten mit einer sehr starken Verflachung ($J_{GA}/J_{GAob} < 0.5$) stark zu Ablagerung (Reuses du Dolent 53-3), Minstigerbach (55-6). Bei mittleren Verflachungen kann allenfalls ein hoher E-l_{akk} Wert die Ablagerung verhindern (Ritigraben (58-4))
- Bei Grossrutschungen mit Verklausungen, kam es in unterhalb liegenden Gerinneabschnitten bei mittleren Verflachungen nicht zu Ablagerungen (Gangbach (49-5) und Haldibach (29-3)). Offenbar wirkten die Schwallwellen ablagerungshemmend.
- Einmündungen bedeutender Seitengerinne, insbesondere wenn diese nicht stark durch Geschiebe belastet sind, können mithelfen, trotz starker Verflachung grössere Ablagerungen zu vermindern (Schwenditobel (19-6), Schwendibach (3-5), Gangbach (49-5), Ri di Ronco (43-11), Mehlbach (31-9)). Beim Reuses du Dolent (53-3) traf dies jedoch nicht zu, allerdings führte dieses Seitengerinne auch kein Hochwasser, da es sich um ein niederschlagsunabhängiges Ereignis gehandelt hat.

- Liegen oberhalb von Verflachungen sehr steile, wasserfallartige Gerinneabschnitte, kann dies bei Grossereignissen trotz starker Verflachung am Wandfuss durch Kolkbildung ablagerungsvermindernd wirken, besonders wenn die $E-I_{akk}$ Werte noch gross sind (Dorfbach (54-7)). Bei häufigeren Ereignissen < 100 jährlich können solche Stufen hingegen stabilisierend wirken, indem sich grössere Ablagerungen am Wandfuss unterhalb der Wasserfälle bilden.

8.2 Geschiebeverlagerung im Gerinne durch Geschiebetrieb

In 6 Analysebächen wurde die gesamte Geschiebefracht rein durch Geschiebetrieb transportiert (Val da Dusch (20), Meisibach (30), Melbach (33), Foribach (35), Dongia (42), Milibach (57)).

Total wurden 97 Gerinneabschnitte mit Transportprozess Geschiebetrieb verzeichnet. Davon wurden als Funktion in 13 Gerinneabschnitten Ablagerung, in 14 Transit und in 70 Erosion beobachtet. Von den 97 Gerinneabschnitten mit Geschiebetrieb sind 36 Gerinneabschnitte sog. „Erstabschnitte“ und 61 Gerinneabschnitte sog. „Unterlieger-Abschnitte“ (vgl. Kap. 5.4.4).

8.2.1 Geschiebemobilisierung durch Gerinneerosion

8.2.1.1 Einsetzen der Erosion in Erstabschnitten

Um überhaupt festzustellen, ab welchen Bedingungen bei Grossereignissen mit Geschiebemobilisierung im Gerinne durch Geschiebetrieb zu rechnen ist, wurden die Bedingungen in allen 36 Erstabschnitten analysiert. Die dabei zu berücksichtigenden Blickwinkel sind die drei lokalen Standortfaktoren Lockermaterialangebot, Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung sowie allfällige Negativfaktoren (vgl. Kap. 5).

Das Lockermaterialangebot in allen 36 Erstabschnitten mit Gerinneerosion durch Geschiebetrieb lag entweder in der Klasse „Lockermaterial unlimitiert“ LMUL oder in der Klasse „Lockermaterial limitiert“ LML.

Abb. 8-19 zeigt die vorherrschenden Bedingungen dieser Erstabschnitte bezüglich Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung sowie die Beeinflussung durch Negativfaktoren.

Zu den lokalen Standortfaktoren kann grundsätzlich festgestellt werden, dass in den analysierten Gerinneabschnitten für das Einsetzen einer relevanten Gerinneerosion durch Geschiebetrieb von $\geq 1 \text{ m}^3/\text{m}$ Erosionsleistung bei Einzugsgebieten kleiner als 2 km^2 eine minimale Gerinneneigung von 10% nötig war. Es wurde zudem keine Gerinneerosion bei einer Einzugsgebietsfläche < 0.025 km^2 beobachtet. Die Kombination der beiden Einflussfaktoren Gerinneneigung und Einzugsgebietsfläche entscheidet darüber, ob in einem Gerinneabschnitt mit Lockermaterialangebot ein Einsetzen der Gerinneerosion möglich ist. Anhand der Daten wurde dazu analog zu Kap. 8.1.1.1 bei den Murgängen, aus den Daten zum Geschiebetrieb ebenfalls eine Funktion berechnet, welche das Grenzgefälle beschreibt, ab welchem bei gegebener Einzugsgebietsfläche Gerinneerosion durch Geschiebetrieb möglich ist.

Sie ist gültig für Einzugsgebietsgrößen bis 2 km² und für Grossereignisse ≥ 100 jährlich und lautet:

$$J_{\text{start}} = -4.86 * A_{\text{EG}} + 18.6$$

J_{start} Mindest-Gefälle des Gerinneabschnitts [%]

A_{EG} Einzugsgebietsfläche oberhalb des Gerinneabschnitts [km²]

4 Gerinneabschnitte wurden durch Negativfaktoren beeinflusst. Es sind dies die Gerinneabschnitte im Fangtobel (32-1) und Foribach (35-1 resp. 35-5) durch den Negativfaktor Kluftwasser (KW), sowie der Gerinneabschnitt im Vadret da l'Alp Ota (21-1) durch den Negativfaktor Flutwelle (FW). Keiner dieser Abschnitte lag im Nahbereich des oben definierten Grenzgefälles. Es kann also gesagt werden, dass diese Negativfaktoren in diesen vier Fällen keinen Einfluss auf die minimalen Bedingungen für das Einsetzen der Gerinneerosion hatten.

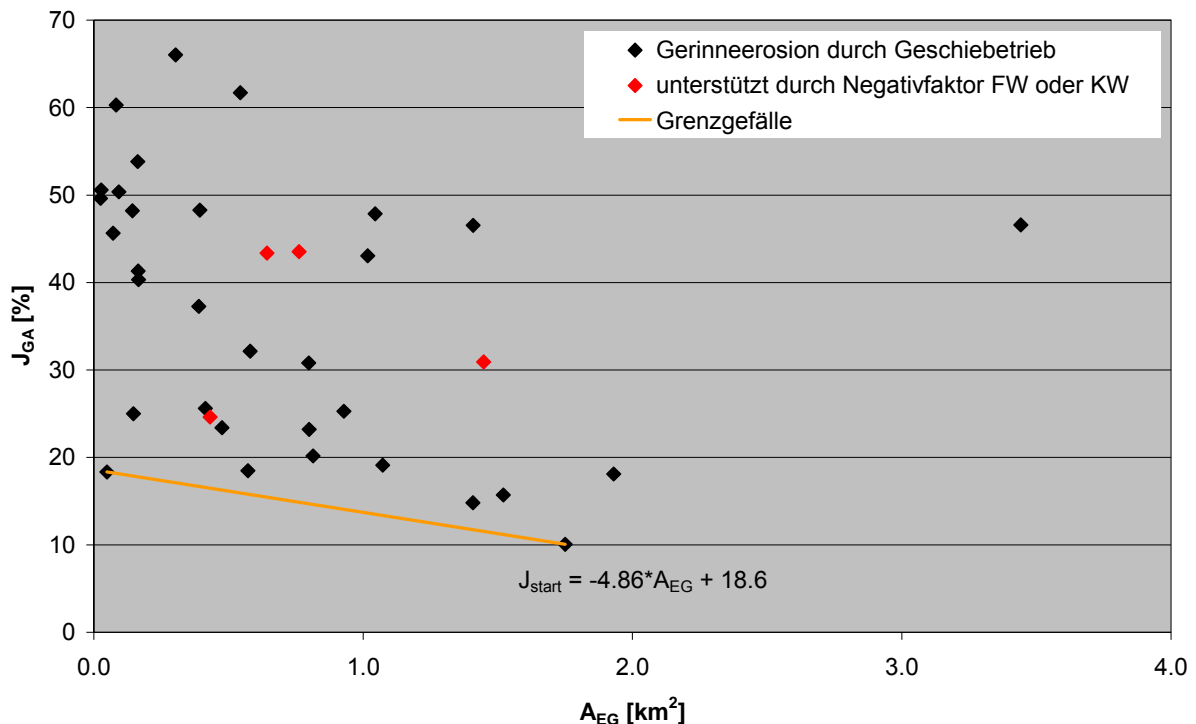


Abb. 8-19: Zusammenhang zwischen Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung bei der Geschiebemobilisierung in Erstabschnitten

8.2.1.2 Beobachtete Erosionsleistungen durch Gerinneerosion

Für die Auswertungen der beobachteten Erosionsleistungen in Abb. 8-20 wurden alle 70 Gerinneabschnitte mit Gerinneerosion durch Geschiebetrieb analysiert. Enthalten sind in dieser Stichprobe somit alle 36 Erstabschnitte und alle 34 Unterlieger-Abschnitte mit Gerinneerosion.

Das oberste Diagramm in Abb. 8-20 zeigt ein Häufigkeitsdiagramm der verschiedenen Erosionsleistungsklassen. In einem grossen Teil der Gerinneabschnitte wurden Erosionsleistungen im Bereich zwischen 1 und 2 m³/m beobachtet. Die maximal beobachtete Erosionsleistung lag bei 11 m³/m im Chummerbach (17-3). Dies ist im Vergleich zu den bei Murgängen beobachteten maximalen Erosionsleistungen von bis zu 250 m³/m ein sehr geringer Wert. Zu bemerken ist auch hier wieder die geringe Stichproben-Anzahl in einigen Erosionsleistungsklassen.

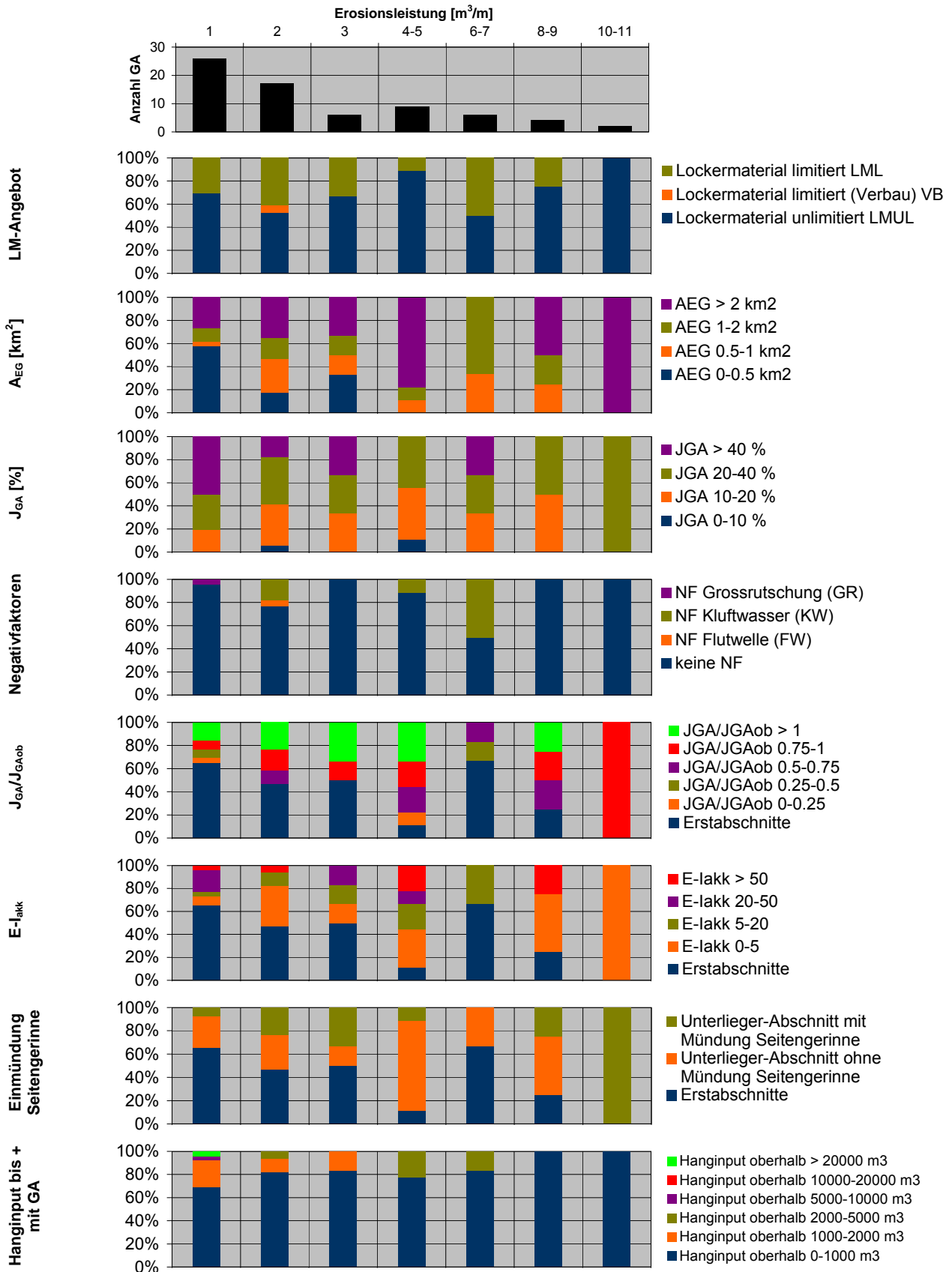


Abb. 8-20: Verteilung der Einflussfaktoren Lockermaterialangebot, Einzugsgebietsfläche, Gerinneneigung, Negativfaktoren, J_{GA}/J_{GAob} , $E-l_{akk}$ und Eimmündung von Seitengerinnen und Hanginput oberhalb an den Erosionsleistungsklassen der Gerinneabschnitte mit Gerinneerosion durch Geschiebetrieb

Es stellt sich nun die Frage, welche Einflussfaktoren für welche Erosionsleistungen verantwortlich sind. Dazu wurden in einem ersten Schritt die Einflussfaktoren der drei lokalen Standortfaktoren (Lockermaterialangebot, Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung), der Bedingungen oberhalb (Gerinneneigung oberhalb, akkumulierter Energie-Index, Einmündung von Seitengerinnen und Hanginput oberhalb) sowie allfällige Negativfaktoren (im Gerinneabschnitt oder weiter oben im Wildbachsystem) einzeln betrachtet und ihre Verteilung in den verschiedenen Erosionsleistungsklassen aufgezeichnet (vgl. Abb. 8-20).

Bei der Einzugsgebietsflächen-Verteilung fällt auf, dass bei Einzugsgebietsflächen $< 0.5 \text{ km}^2$ keine Erosionsleistungen $> 3 \text{ m}^3/\text{m}$ vorgekommen sind. Bei der Betrachtung der Verteilung des Lockermaterialangebots in Bezug auf die Erosionsleistung wird ersichtlich, dass ausser in der höchsten Erosionsleistungsklasse überall auch Gerinneabschnitte mit limitiertem Lockermaterial enthalten sind. Erosionsleistungen im oberen Bereich waren somit in den analysierten Gerinneabschnitten nur bedingt an das Lockermaterialangebot gebunden, da die Bedingungen bei Geschiebetrieb trotz limitiertem Lockermaterialangebot aufgrund des Transportprozesses immer noch im abflusslimitierten Bereich liegen können. Bei der Gerinneneigung fällt auf, dass lediglich in 2 Gerinneabschnitten unter 10% Gefälle, überhaupt Gerinneerosion beobachtet wurde. Alle anderen Gerinneabschnitte waren steiler als 10%.

In 4 Wildbächen gab es Gerinneabschnitte mit Gerinneerosion durch Geschiebetrieb, die direkt oder indirekt (durch Gerinneabschnitte oberhalb) durch Negativfaktoren beeinflusst wurden. Zusätzlich zu den bei den Erstabschnitten genannten 3 Wildbächen Fangtobel (32), Foribach (35) und Vadret da l'Alp Ota 21) ist dabei der Unterlieger-Abschnitt im Schwarzbächli (5-3) zu nennen, der durch den Negativfaktor „Grossrutschung“ in einem oberen Abschnitt beeinflusst wurde.

Die Einflussfaktoren der „Bedingungen oberhalb“ wirken per Definition nur in Unterlieger-Abschnitten. Ein Grossteil der Gerinneabschnitte mit kleineren Erosionsleistungen sind Erstabschnitte. Bei den Unterlieger-Abschnitten lassen sich einzeln betrachtet sowohl beim Vergleich der Gerinneneigung im Gerinneabschnitt mit derjenigen im oberen Gerinneabschnitt (J_{GA}/J_{GAob}) als auch beim akkumulierten Energie-Index ($E-I_{akk}$) keine klaren Tendenzen in den Verteilungen und den daraus resultierenden Erosionsleistungen finden. Bei der Einmündung von Seitengerinnen kann beobachtet werden, dass alle Gerinneabschnitte in der höchsten Erosionsleistungsklasse vorher eine Einmündung eines Seitengerinnes zu verzeichnen hatten. Allerdings muss beachtet werden, dass die Stichprobe mit nur 2 Gerinneabschnitten sehr klein ist. Beim Hanginput bis und mit dem Gerinneabschnitt, wo auch Erstabschnitte wiederum berücksichtigt werden konnten, ist hingegen ersichtlich, dass die Gerinneabschnitte in den beiden höchsten Erosionsleistungsklassen in keinem einzigen Fall aus dem Hang oder aus Hängen oberhalb einen Geschiebeinput hatten. Die Transportkapazität war also in diesen Fällen nicht zusätzlich ausgelastet durch Lockermaterial aus den Hängen und war somit ganz zur Verfügung, um Lockermaterial aus dem Gerinne zu mobilisieren.

Nachdem nun Tendenzen der einzelnen Einflussfaktoren der verschiedenen Blickwinkel betrachtet wurden, soll nun deren Kombination analysiert werden.

Abb. 8-21 zeigt die Erosionsleistungen in den 47 Gerinneabschnitten mit Gerinneerosion durch Geschiebetrieb, welche im unlimitierten Lockermaterial liegen, in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche (A_{EG}) und der Gerinneneigung (J_{GA}). Aufgrund des unlimitierten Lockermaterials kann davon ausgegangen werden, dass die Bedingungen in diesen Gerinneabschnitten mehr oder weniger abflusslimitiert sind und die verschiedenen Einflussfaktoren dadurch nicht

aufgrund des limitierten Lockermaterialangebots in ihrer Wirkung ganz oder teilweise unterbunden werden.

Grundsätzlich ist ersichtlich, dass mit zunehmender Gerinneneigung und zunehmender Einzugsgebietsfläche die Erosionsleistungen steigen. Je steiler und je mehr Abfluss ein Gerinneabschnitt hat, umso grösser kann die Erosionsleistung in diesem Gerinneabschnitt werden.

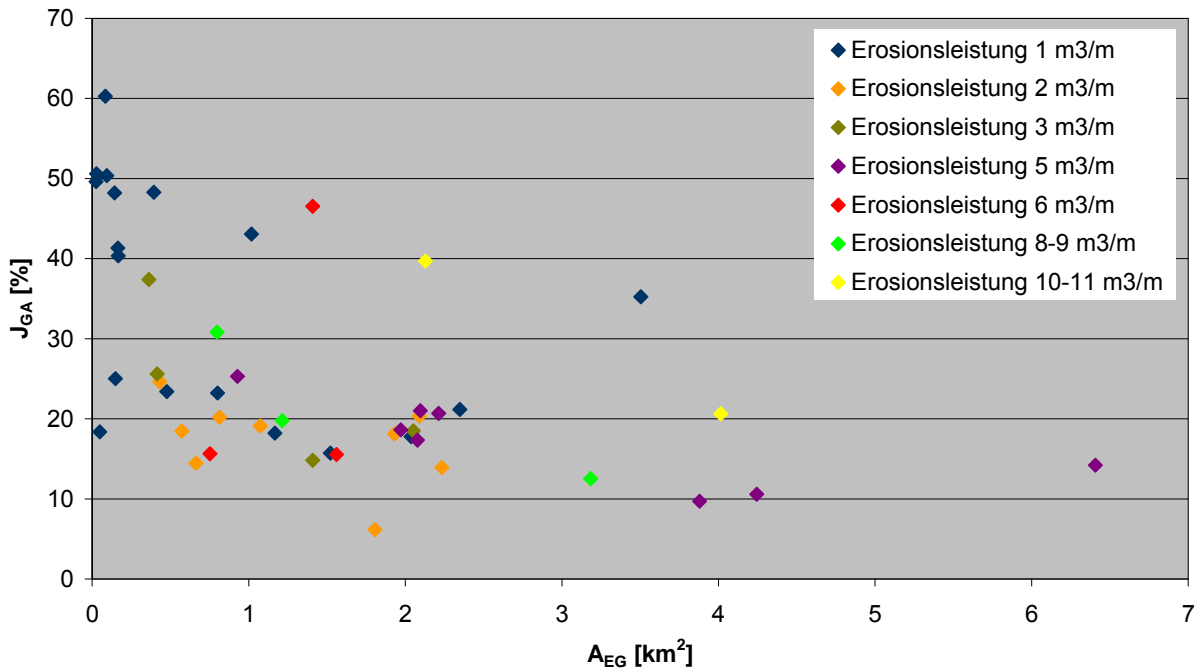


Abb. 8-21: Erosionsleistungen durch Geschiebetrieb in Gerinneabschnitten im unlimitierten Lockermaterial in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgrösse und von der mittleren Gerinneneigung

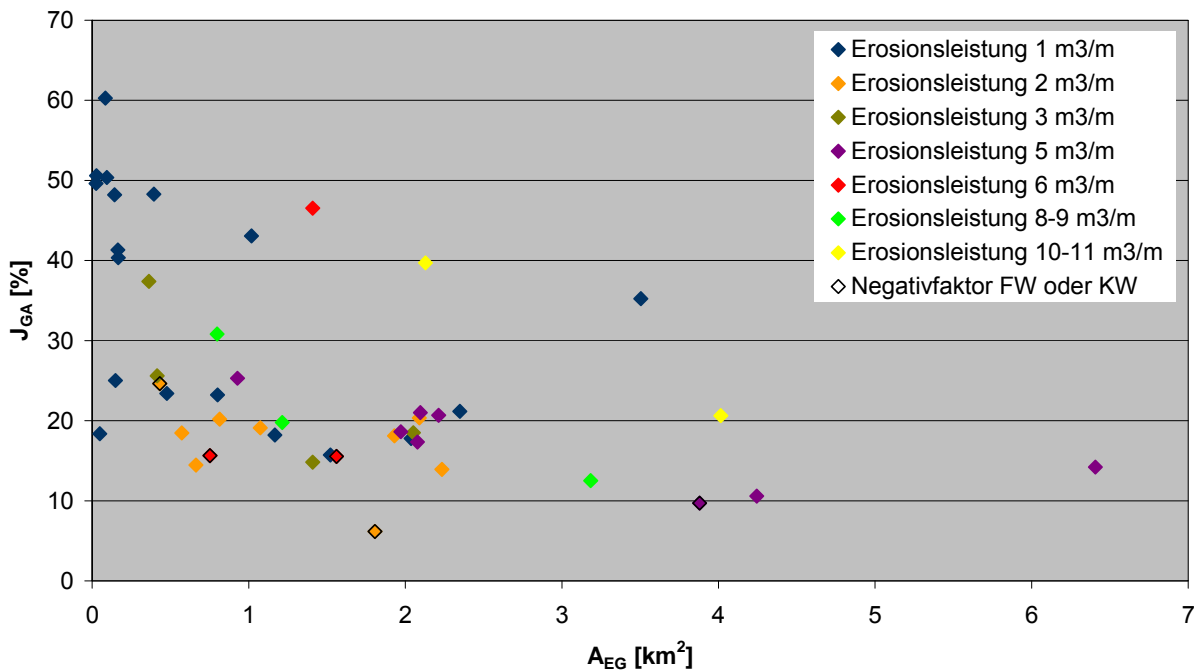


Abb. 8-22: Erosionsleistungen durch Geschiebetrieb in Gerinneabschnitten im unlimitierten Lockermaterial mit und ohne Negativfaktoren in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgrösse, von der mittleren Gerinneneigung

Zusätzlich lassen sich einige Tendenzen weiterer Einflussfaktoren beobachten. Dazu ist in Abb. 8-22 die Grafik in Abb. 8-21 ergänzt mit Markierungen derjenigen Gerinneabschnitte, in denen direkt oder oberhalb einer der Negativfaktoren Flutwelle oder Kluftwasser beobachtet wurde. Dies bedeutet, dass in diesen Gerinneabschnitten mehr Abfluss zur Verfügung stand als es der Parameter Einzugsgebietsfläche anzeigt. Es sind dies die Gerinneabschnitte Vadret da l'Alp Ota (21-2) und Foribach (35-2, 35-4, 35-6, 35-7). Betrachtet man die Lage der betreffenden Gerinneabschnitte im Vergleich zu ihren Nachbarnpunkten (Lage im Diagramm), welche ähnliche Bedingungen betreffend Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung, jedoch keine Negativfaktoren haben, wird ersichtlich, dass die Nachbarn tendenziell kleinere Erosionsleistungen haben. Dies bedeutet, dass die Gerinneabschnitte mit Negativfaktoren aufgrund der Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung her eigentlich eher in einer tieferen Erosionsleistungsklasse liegen würden, der zusätzliche Abflussinput sie jedoch auf ein höheres Niveau gebracht hat. Betrachtet man die Gerinneabschnitte mit Negativfaktoren im Vergleich zu ihren Erosionsklassen-Mitgliedern (Punkte gleicher Farbe im Diagramm) ohne Beeinflussung durch Negativfaktoren, beobachtet man, dass die durch Flutwellen oder Kluftwasser beeinflussten Gerinneabschnitte alle am linken oder unteren Rand der Punktwolken ihrer Erosionsleistungsklasse liegen. Dies bedeutet, dass sie tendenziell eher im Grenzbereich dieser Klasse liegen und trotz kleinerer Werte der Einzugsgebietsfläche oder der Gerinneneigung im Vergleich zu ihren Klassen-Mitgliedern gleiche Erosionsleistungen erzielt haben.

Abb. 8-23 zeigt wiederum dieselbe Grafik mit zusätzlicher Markierung der Gerinneabschnitte, mit den Einflussfaktoren der „Bedingungen oberhalb“, welche ebenfalls eine erhöhte Erosionsleistung bringen können:

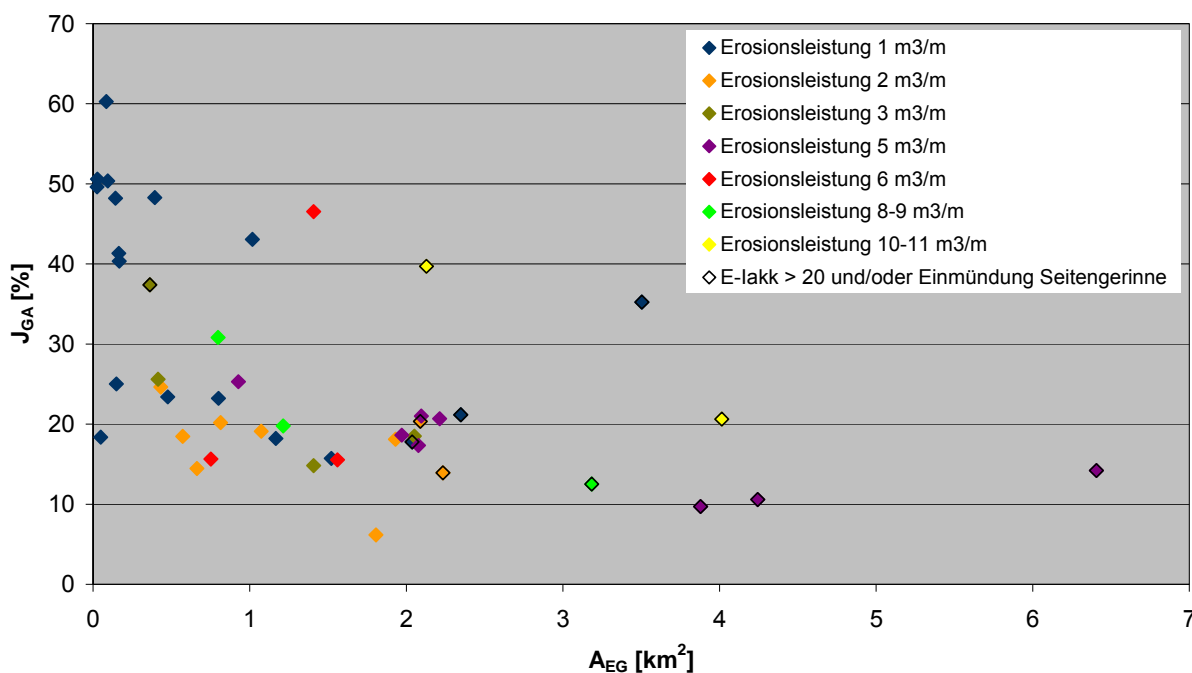


Abb. 8-23: Erosionsleistungen durch Geschiebetrieb in Gerinneabschnitten im unlimitierten Lockermaterial mit und ohne erosionsfördernde Faktoren in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgröße, von der mittleren Gerinneneigung

Markiert sind alle Gerinneabschnitte mit einem akkumulierten Energie-Index $E-l_{akk} > 20$ und/oder einer zusätzlichen Einmündung eines bedeutenden Seitengerinnes. Beide Einflussfaktoren haben eine kurzfristig erhöhte Transportkapazität zur Folge. Betroffen sind die Gerinne-

neabschnitte Tanzhubelbächli (7-6), Riggisalpbach (16-3), Chummerbach (17-3), Val Valdun (23-3), Meisibach (30-8), Melbach (33-5), Foribach (35-7), Ri di Bedretto (40-3), Dongia (42-3, 42-5, 42-7 und 42-14). Praktisch alle Gerinneabschnitte mit einer Einzugsgebietsfläche $> 2 \text{ km}^2$ profitierten von dieser erhöhten Transportkapazität. Der Effekt einer dadurch erhöhten Erosionsleistung kann aber mangels Vergleichs-Abschnitten ohne solch erosionsfördernder Faktoren nicht geklärt werden. Die Aussagekraft dieser Grafik beschränkt sich darauf, dass ersichtlich wird, dass sich hohe $E-I_{\text{akk}}$ überhaupt nur ab einer gewissen Einzugsgebietsfläche bilden können und auch bedeutende Seitengerinne erst in den unteren Teilen von Einzugsgebieten einmünden.

In Abb. 8-24 sind demgegenüber die Gerinneabschnitte markiert, welche aufgrund der Einflussfaktoren aus dem Blickwinkel „Bedingungen oberhalb“ eher einen negativen Einfluss auf die Erosionsleistung haben können, nämlich durch hohen Geschiebeinput aus dem Hang in oberhalb liegenden Abschnitten und im Gerinneabschnitt selber oder durch eine Verflachung bezüglich des Gerinneabschnitts direkt oberhalb. Ausser bei einem Gerinneabschnitt mit $6 \text{ m}^3/\text{m}$ Erosionsleistung (Foribach 35-2) ist bei allen Gerinneabschnitten (Schwarzbächli 5-3, Meisibach 30-8, Dongia 42-3, 42-5, 42-14) folgender Effekt sichtbar: Die direkten Nachbarn (Lage im Diagramm) der markierten Gerinneabschnitte haben alle tendenziell eher grössere Erosionsleistungen und die Lage der markierten Gerinneabschnitte bezüglich der Punktwolke der eigenen Erosionsleistungsklasse (Punkte gleicher Farbe im Diagramm) ist eher rechts, was bedeutet, dass durch grossen Hanginput und Verflachung des Gerinnes die Erosionsleistung im Gerinne eher gehemmt wurde und die Gerinneabschnitte trotz höheren Einzugsgebietsflächen nicht mehr Erosionsleistung gezeigt haben als ihre Klassen-Mitglieder. Der betreffende Gerinneabschnitt im Foribach (35-2) hingegen, wurde neben diesen hemmenden Faktoren auch von einem erhöhenden Faktor, nämlich dem Negativfaktor Kluftwasser beeinflusst (vgl. Abb. 8-22).

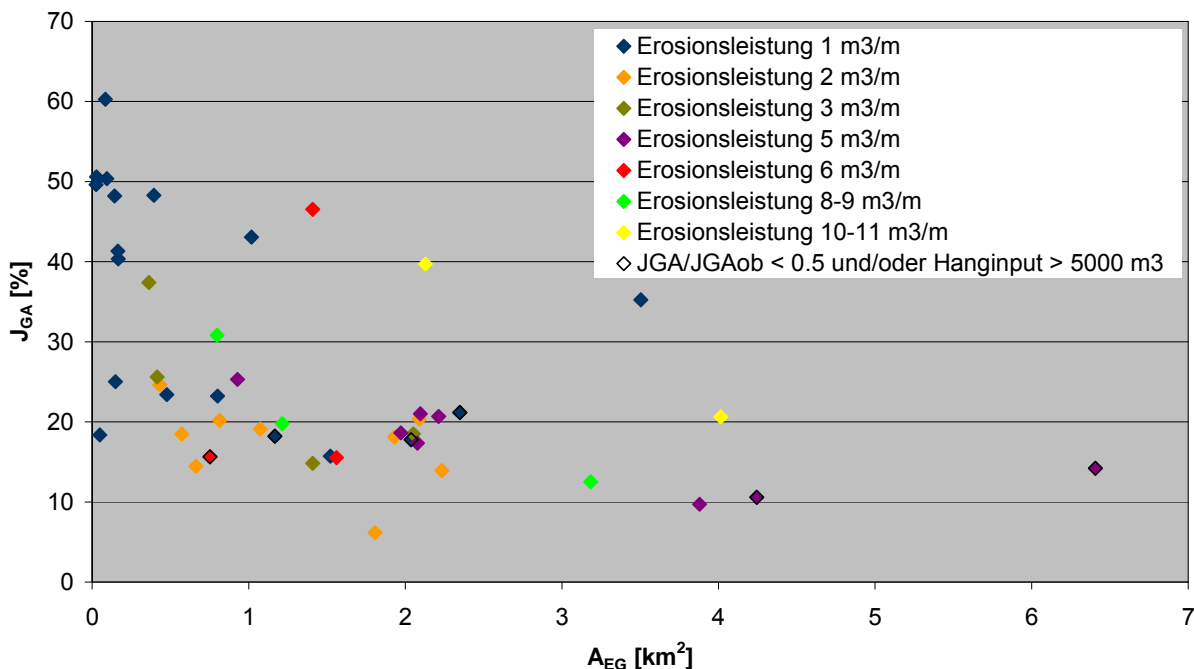


Abb. 8-24: Erosionsleistungen durch Geschiebetrieb in Gerinneabschnitten im unlimitierten Lockermaterial mit oder ohne erosionshemmende Faktoren in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsgrösse, von der mittleren Gerinneneigung

Fazit und Verallgemeinerung

Als Fazit kann gesagt werden, dass in erster Linie die Einflussfaktoren der lokalen Standortfaktoren (Lockermaterialangebot, Einzugsgebietsfläche, Gerinneneigung) über die Erosionsleistungen im Gerinne durch Geschiebetrieb entscheiden. Die beiden Negativfaktoren Kluftwasser (KW) und Flutwelle (FW) wirkten zusätzlich unterstützend, so dass unter ihrer Mithilfe tendenziell grössere Erosionsleistungen resultierten. Die unterstützende Wirkung durch hohe Werte des akkumulierten Energie-Index sowie durch die Einmündung von bedeutenden Seitengerinnen konnte nicht abschliessend geklärt werden. Tendenziell eher hemmend auf die Erosionsleistung wirkten grössere Hangprozesse im oder oberhalb des Gerinneabschnitts.

8.2.2 Geschiebeumlagerung und –ablagerung

Für den Transportprozess Geschiebetrieb können zur Beurteilung von allfälligen Ablagerungen Berechnungen zur Transportkapazität nach Rickenmann (1990) (Kap. 2.5.5.2) oder Smart & Jäggi (1983) (vgl. Kap. 2.5.5.1) berücksichtigt werden. Hierzu sind Feldaufnahmen von Querprofilen und Linienproben sowie eine Hochwasserganglinie als Grundlage nötig.

Im Datensatz dieser Arbeit befinden sich insgesamt 13 Ablagerungsstrecken in Unterliegerabschnitten mit Transportprozess Geschiebetrieb. Davon abgezogen wurden die beiden Gerinneabschnitte Schwarzbächli (5-2) und Sandbach (2-4), bei welchen ein Murgang-Stop erfolgte. Diese wurden bereits bei den Ablagerungsbedingungen bei Murgängen behandelt. Da sich bei den Auswertungen der Murgang-Ablagerungsstrecken gezeigt hat, dass spezielle Bedingungen wie Geschiebesammler oder Durchlässe im Höhenmodell und somit im Einflussfaktor J_{GA}/J_{GAob} nicht abgebildet werden können, wurden 3 solche Gerinneabschnitte nicht für die Analysen verwendet. Gerinneabschnitt Riggisalpbach (16-4) war ein Geschiebesammler, in den Gerinneabschnitten Milibach (57-2) und (57-4) führten lokale Erosionsbasen zu zwei kurzen Ablagerungsstrecken von rund 30 m. Somit wurde auf der Basis der 8 restlichen Ablagerungsstrecken Analysen hinsichtlich der relevanten Einflussfaktoren gemacht.

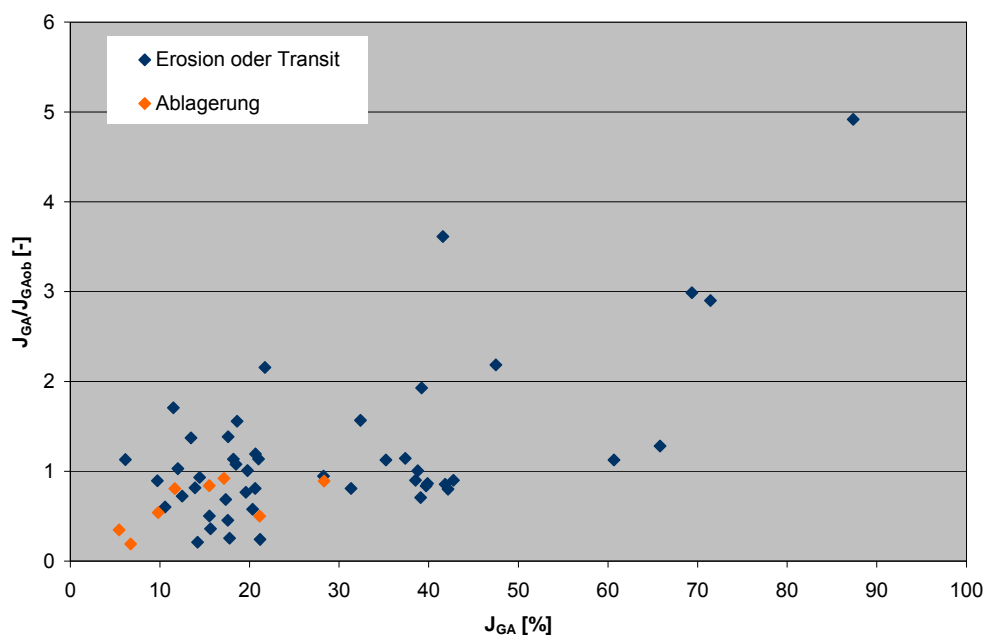


Abb. 8-25: Funktion der Gerinneabschnitte mit Geschiebetrieb in Abhängigkeit von der Gerinneneigung im Gerinneabschnitt (J_{GA}) und dem Verhältnis zu jener im oberen Gerinneabschnitt (J_{GA}/J_{GAob})

Abb. 8-25 zeigt die Funktion der Gerinneabschnitte aller Unterlieger-Abschnitte mit Geschiebetrieb in Abhängigkeit von der Gerinneneigung im Gerinneabschnitt (J_{GA}) und vom Verhältnis zum oberhalb liegenden Gerinneabschnitt (J_{GA}/J_{GAob}). Auf den ersten Blick wird ersichtlich, dass die Gerinneabschnitte mit Ablagerung relativ gut abgegrenzt werden können. Es wurden nur Ablagerungsstrecken beobachtet bei Gerinneneigungen $< 30\%$ und einem Verhältnis zur Gerinneneigung im oberen Gerinneabschnitt < 1 . Alle 8 Ablagerungsstrecken befinden sich in diesem Bereich. Ebenfalls befinden sich hier aber auch 16 Gerinneabschnitte, in denen Erosion beobachtet wurde, darunter auch der Gerinneabschnitt Chummerbach (17-3), in welchem die maximale Erosionsleistung von $11 \text{ m}^3/\text{m}$ verzeichnet wurde.

Um Gründe zu suchen, warum einige Gerinneabschnitte abgelagert haben, andere aber nicht, wurden die 24 Gerinneabschnitte im „vermeintlichen Ablagerungsbereich“ näher betrachtet. In Abb. 8-26 ist der Ausschnitt aus Abb. 8-25 eingezoomt, in dem Ablagerungen stattgefunden haben. Zusätzlich wurde bei den Gerinneabschnitten mit Ablagerung der sog. Ablagerungsfaktor dargestellt. Grundsätzlich müsste der Ablagerungsfaktor umso grösser werden, je flacher der Gerinneabschnitt ist und je kleiner das Verhältnis J_{GA}/J_{GAob} ist. Wie die Grafik in Abb. 8-26 zeigt, wird diese Überlegung anhand der Daten nicht bestätigt.

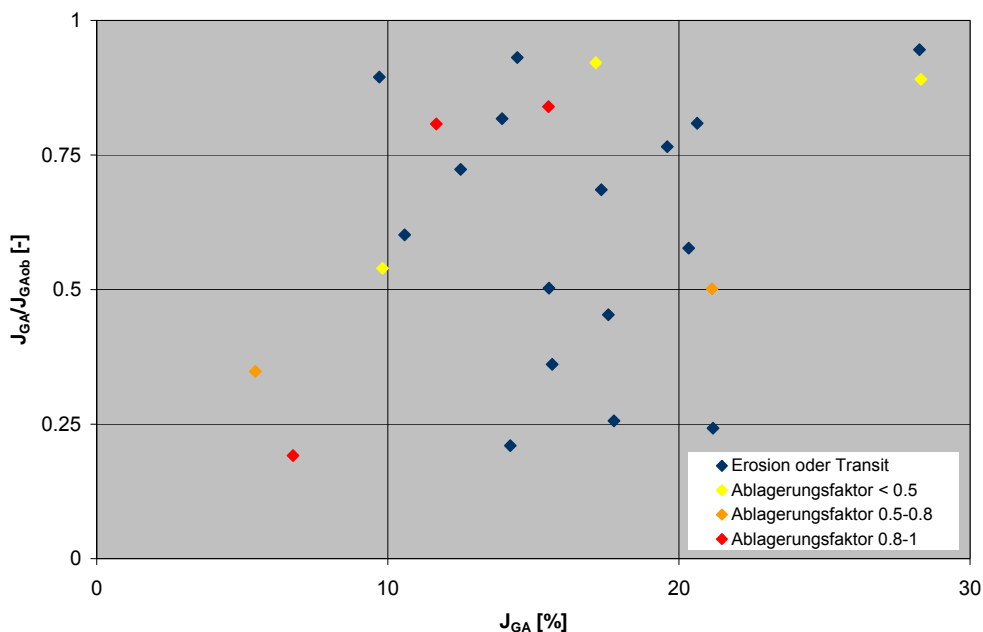


Abb. 8-26: Detaillierte Ansicht der Funktion der Gerinneabschnitte mit Geschiebetrieb in Abhängigkeit von der Gerinneneigung im Gerinneabschnitt (J_{GA}) und dem Verhältnis zu jener im oberen Gerinneabschnitt (J_{GA}/J_{GAob})

In Tab. 8-4 sind die Kennzahlen der verschiedenen Einflussfaktoren der in Abb. 8-26 dargestellten Gerinneabschnitte aufgeführt. Dabei wurde eine Klassierung aufgrund der Gerinneneigung J_{GA} vorgenommen und die darin enthaltenen Gerinneabschnitte jeweils nach den Werten des Faktors J_{GA}/J_{GAob} sortiert.

Tab. 8-4: Kennzahlen der Gerinneabschnitte $J_{GA} < 30\%$ und $J_{GA}/J_{GAob} < 1$ mit Geschiebetrieb

	Gerinneabschnitt	Ablagerungsfaktor Anteil der abgelagerten Geschiebefracht	Erosionsleistung	J_{GA}/J_{GAob}	Hanginput < 5000 m ³	Hanginput 5'000-20'000 m ³	Hanginput (NF GR) > 20'000 m ³	NF KW oder FW	E-I _{akk} 5-20	E-I _{akk} 20-50	E-I _{akk} >50	Einmündung bedeutendes Seitengerinne
J _{GA} 0-10%	Dongia 42-8	0.96		0.19	x					x		
	Foribach 35-3	0.51		0.35				x	x			
	Schwarzbächli 5-4	0.16		0.54	x		x					
	Foribach 35-7		5	0.89	x			x	x			x
J _{GA} 10-20%	Dongia 42-14		5	0.21	x						x	
	Dongia 42-3		1	0.25	x					x		
	Foribach 35-2		6	0.36	x			x	x			
	Meisibach 30-7		1	0.45		x					x	
	Foribach 35-6		6	0.50				x	x			
	Meisibach 30-8		5	0.60		x					x	
	Val da Dusch 20-2		5	0.69	x							
	Melbach 33-5		8	0.72								x
	Melbach 33-2		0	0.77								
	Schwarzbächli 5-9	0.9		0.81								
	Riggisalpbach 16-3		2	0.82								x
	Schwarzbächli 5-7	0.93		0.84								
	Sandbach 2-6	0.44		0.92								
	Schwarzbächli 5-8		2	0.93					x			
J _{GA} 20-40%	Dongia 42-5		1	0.24	x					x		
	Ri di Bedretto 40-7	0.67		0.50	x						x	
	Ri di Bedretto 40-3		2	0.58								x
	Chummerbach 17-3		11	0.81	x							x
	Milibach 57-6	0.4		0.89							x	
Milibach 57-3		4	0.95						x			

In 3 von 4 Gerinneabschnitten mit einer Gerinneneigung < 10% lagerte sich Geschiebe ab. Je grösser die Verflachung war, umso grösser war der Ablagerungsfaktor. Die kleinste Verflachung lag bei demjenigen Gerinneabschnitt vor, der nicht abgelagerte. Die beiden Gerinneabschnitte mit einem J_{GA}/J_{GAob} von kleiner 0.5 (Dongia 42-8 und Foribach 35-3) lagerten trotz relativ hohem akkumulierten Energie-Index E-I_{akk} oder Negativfaktor Kluftwasser ab, diese erosionsfördernden Einflussfaktoren hatten somit anscheinend keinen genügend grossen Einfluss, um grössere Mengen Geschiebe über die starken Verflachungen zu transportieren. Bei den beiden Gerinneabschnitten mit kleinerer Verflachung ($J_{GA}/J_{GAob} > 0.5$) verzeichnete der Gerinneabschnitt Foribach (35-7) mit ausgeprägten erosionsfördernden Faktoren (Negativfaktor Kluftwasser, mittlerer E-I_{akk} und zusätzlicher Einmündung eines bedeutenden Seitengerinnes) Erosion, während der Gerinneabschnitt Schwarzbächli (5-4) ohne erosionsfördernder Einflussfaktoren, dafür mit dem erosionshemmenden Negativfaktor Grossrutschung (GR) oberhalb im Einzugsgebiet abgelagerte.

3 von 14 Gerinneabschnitten mit einer Gerinneneigung zwischen 10% und 20% lagerten Geschiebe ab. Erstaunlicherweise liegen alle Gerinneabschnitte mit Ablagerung im Bereich mit hohen Verhältnissen J_{GA}/J_{GAob} . Betrachtet man die Gerinneabschnitte mit einer starken Verflachung ($J_{GA}/J_{GAob} < 0.5$), fällt auf, dass alle diese 5 Gerinneabschnitte mit Erosion mindestens einen der erosionsfördernden Einflussfaktoren Negativfaktor Kluftwasser (KW), mittlerer bis

hoher $E-I_{akk}$ oder eine Einmündung eines bedeutenden Seitengerinnes zu verzeichnen hatten. Dass in diesen Gerinneabschnitten keine Ablagerungen stattfanden, kann somit erklärt werden. Bei den Gerinneabschnitten mit einem Verhältnis $J_{GA}/J_{GAob} > 0.5$ fallen keine Muster auf, die Ablagerungen der 3 Gerinneabschnitte Schwarzbächli (5-7 und 5-9) und im Sandbach (2-6) können nicht durch die betreffenden Einflussfaktoren erklärt werden.

2 von 6 Gerinneabschnitten mit Gerinneneigungen zwischen 20 und 30% lagerten Geschiebe ab (Ri di Bedretto (40-7) und Milibach (57-6)). Bezüglich erosionsfördernder und –hemmender Faktoren können diese Gerinneabschnitte nicht von denjenigen mit Erosion abgegrenzt werden, praktisch alle hatten ähnliche erosionsfördernde Einflussfaktoren in Form von mittleren bis hohen $E-I_{akk}$ -Werten oder Einmündungen von bedeutenden Seitengerinnen zu verzeichnen. Als einzige Auffälligkeit kann gesagt werden, dass sich beide Ablagerungsstrecken unmittelbar vor dem Kegelhals befinden und dass bei beiden Ereignissen in der Ereignisanalyse (BWW, GIUB 1990) die Jährlichkeit auf unter 100 abgeschätzt wurde. Die Ablagerungen könnten somit damit begründet werden, dass kurz vor dem Kegelhals, wo das Gerinnegefälle im Vergleich zu oben bereits relativ gering ist, bei kleineren und häufigeren Ereignissen eher mit Ablagerung gerechnet werden muss als bei Grossereignissen.

9 Geschiebeaustrag

Als Geschiebeaustrag wird in dieser Arbeit die Geschiebefracht verstanden, welche durch eine Aufsummierung der Geschiebebilanzen aller geschieberelevanten Gerinneabschnitte am Kegelhals eintrifft und auf den Schwemmkegel und von dort in den Vorfluter geführt wird (vgl. auch Abb. 9-1).

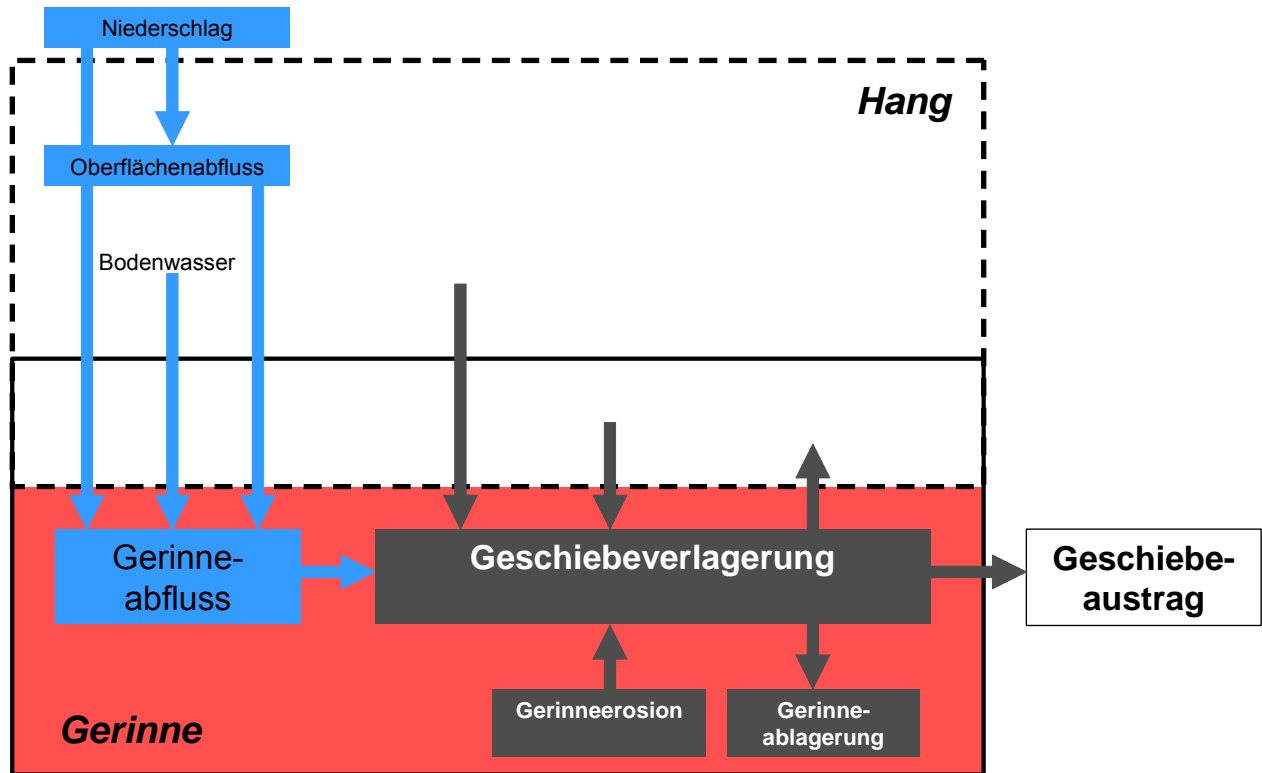


Abb. 9-1: Vereinfachtes Prozesssystem Wildbach mit Fokus auf den Feststoffaustrag (verändert nach Liener 2000)

In Abb. 9-2 sind die spezifischen Geschiebefrachten aller Grossereignisse in den 58 Analysebächen in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche und von allfälligen Negativfaktoren mit und ohne bedeutende Zwischenablagerungen dargestellt. Von bedeutenden Ablagerungen wird hier gesprochen, wenn Zwischenablagerungen im Einzugsgebiet stattgefunden haben, bei welchen ein Volumen von $> 1/3$ der Gesamt-Geschiebefracht am Kegelhals abgelagert wurde. In Tab. 9-1 sind die entsprechenden Kennzahlen tabellarisch und rangiert nach der höchsten spezifischen Geschiebefracht aufgeführt.

Als erstes Merkmal kann deutlich die abnehmende spezifische Geschiebefracht mit zunehmender Einzugsgebietsfläche gezeigt werden. Unterscheidet man Grossereignisse mit Negativfaktoren von den übrigen, fällt auf, dass die obere Grenze der maximal beobachteten spezifischen Geschiebefrachten bei Grossereignissen, beeinflusst durch Negativfaktoren deutlich und klar auf einem höheren Niveau liegt als bei den Grossereignissen ohne Beeinflussung durch Negativfaktoren. Extrem hohe spezifische Geschiebefrachten sind praktisch nur bei Grossereignissen möglich, bei welchen Negativfaktoren ohne bedeutende Zwischenablagerungen aktiv waren. Die mit Abstand höchsten spezifischen Geschiebefrachten wurden in den Wildbächen Saxé (52) (vgl. Abb. 9-3) und Tüfeltaal (48) (vgl. Abb. 6-9) gemessen, beides Grossereignisse, in denen der Negativfaktor „Ausräumung auf Stauhorizont“ aktiv war.

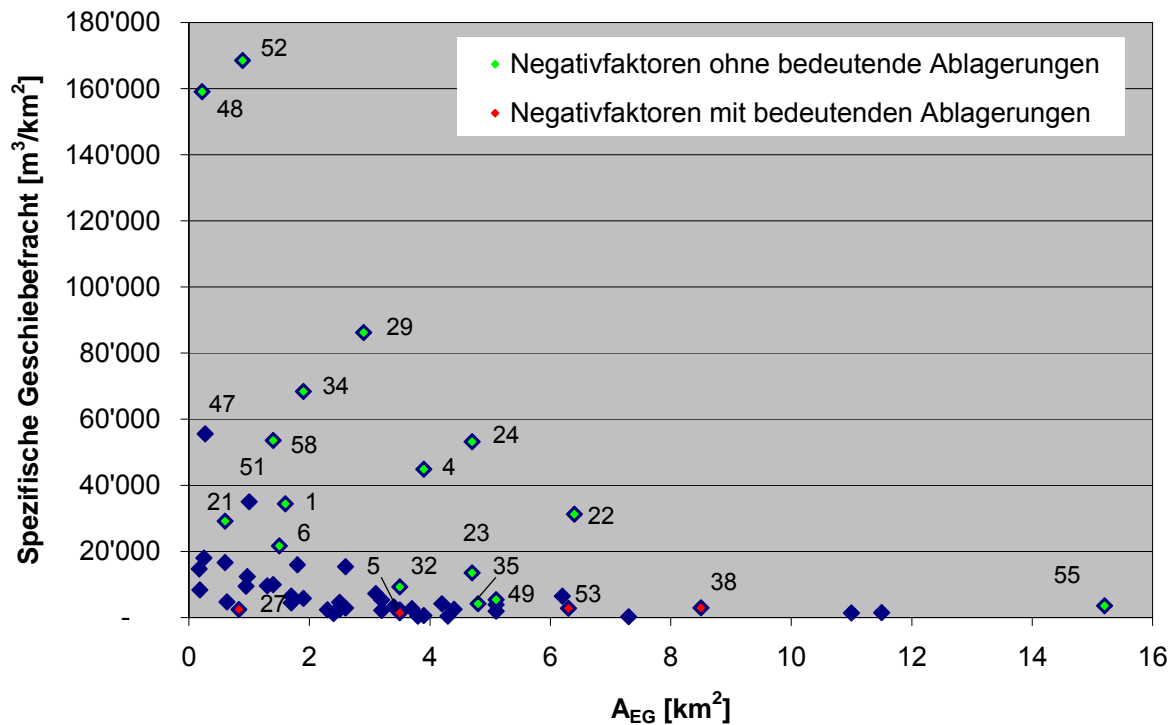


Abb. 9-2: Spezifische Geschiebefrachten der Analysebäche in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche, Negativfaktoren mit und ohne bedeutende Ablagerungen

Gefolgt werden sie von den Grossereignissen im Haldibach (29) und Acherlibach (34), in welchen Grossrutschungen abgegangen sind, beim Haldibach kombiniert mit einer Verkläusung. Zwischen 40'000 und 60'000 m³/km² liegt das höchste Ereignis, das keinen Negativfaktor zu verzeichnen hatte, das Grossereignis im Chiletal (47), sowie die durch Negativfaktoren beeinflussten Grossereignisse im Ritigraben (58, PF), Plaunca (24, VKAS) und Rotlaubibach (4, BM und 3HG). Zwischen 20'000 und 40'000 m³/km² liegen anschliessend das zweite, nicht von einem Negativfaktor beeinflusste Grossereignis im Nant du Pissot (51), dann die Negativfaktor-Ereignisse Glyssibach (1, GR), Val Varuna (22, VK), Vadret da l'Alp Ota (21, FW). Mit einer spezifischen Geschiebefracht > 20'000 m³/km² sind noch zu erwähnen die Grossereignisse mit Negativfaktoren Val Valdun (23, 3HG), Fangtobel (32, KW), Gangbach (49, GRVK), Foribach (35, KW) und Minstigerbach (55, AS), wobei letztere zwei auch Ablagerungen zu verzeichnen hatten, jedoch vom Volumen her im Vergleich zur Gesamtfracht am Kegelhals relativ wenige. Von Negativfaktoren betroffene Grossereignisse mit bedeutenden Ablagerungen wurden in den Bächen Lauigraben (27, KW), Schwarzbächli (5, GR), Reuses du Dolent (53, BM) und Flibach (38, GR) beobachtet. Sie haben alle deutlich kleinere spezifische Geschiebefrachten zu verzeichnen.

Tab. 9-1: Spez. Geschiebefrachten, Negativfaktoren und bedeutende Ablagerungen in den Analysebächen

Code	Analysebach	A _{EG} [km ²]	Geschiebefracht am Kegelhalbs [m ³]	Spezifische Geschiebefracht [m ³ /km ²]	Negativfaktoren	Bedeutende Ablagerungen
52	Saxé	0.89	150'000	168'539	AS	
48	Tüfelfal	0.22	30'000-40'000	159'091	AS	
29	Haldibach	2.90	250'000	86'207	GRVK	
34	Acherlibach	1.90	120'000-140'000	68'421	KWGR	
47	Chiletal	0.27	15'000	55'556		
58	Ritigraben	1.40	60'000-90'000	53'571	PF	
24	Plaunca	4.70	ca. 250'000	53'191	VKAS	
4	Rotlaubach	3.90	250'000-300'000	44'872	BM3HG	
51	Nant du Pissot	1.00	35'000	35'000		
1	Glyssibach	1.60	50'000-60'000	34'375	GR	
22	Val Varuna	6.40	200'000	31'250	FW	
21	Vadret da l'Alp Ota	0.60	15'000-20'000	29'167	FW	
6	Rote Bach	1.50	30'000-35'000	21'667	FW	
10	Fallbach	0.25	4'000-5'000	18'000		
39	Usser Dorfbach	0.60	10'000	16'667		
25	Val Farbertg	1.80	24'500-33'000	15'972		
37	Edisriederbach	2.60	ca. 40'000	15'385		
12	Spisgraben	0.17	2'000-3'000	14'706		
23	Val Valdun	4.70	56'000-71'000	13'511	3HG	
44	Ruchtal	0.97	12'000	12'371		
18	Alpenbach	1.40	14'000	10'000		
28	Humligenbach	1.30	10'000-15'000	9'615		
46	Näsitalbach	0.95	8'000-10'000	9'474		
32	Fangtobel	3.50	30'000-35'000	9'286	KW	
8	Indrist Weid Bach	0.18	1'000-2'000	8'333		
36	Dorfbach	3.10	20'000-25'000	7'258		
50	Rio de Tennasses	1.70	10'000-12'000	6'471	VK	
17	Chummerbach	6.20	40'000	6'452		
41	La Guasta	1.90	10'000-12'000	5'789		
49	Gangbach	5.10	25'000-30'000	5'392	GRVK	
43	Ri di Ronco	3.20	14'000-20'000	5'313		
31	Mehlbach	0.63	3'000	4'762		
7	Tanzhubelbächli	2.50	10'000-13'000	4'600		
13	Wartenberggraben	1.70	5'000-10'000	4'412		
35	Foribach	4.80	20'000	4'167	KW	
56	Bruchi	4.20	15'000-20'000	4'167		
45	Holdenbach	5.10	ca. 20'000	3'922		
55	Minstigerbach	15.20	45'000-63'000	3'553		
20	Val da Dusch	3.40	10'000-12'000	3'235		
38	Flibach	8.50	20'000-30'000	2'941	GR	ja
9	Spissibach	2.60	5'000-10'000	2'885		
53	Reuses du Dolent	6.30	15'000-20'000	2'778	BM	ja
16	Riggisalpbach	3.70	10'000	2'703		
30	Meisibach	4.40	10'000-12'000	2'500		
27	Lauigraben	0.83	2'000	2'410	KW	ja
11	Louwibach	2.50	6000	2'400		
2	Sandbach	2.30	5'000-6'000	2'391		ja
54	Dorfbach	3.50	6'000-10'000	2'286		
33	Melbach	3.20	7'000	2'188		
26	Val Gronda	5.10	10'000	1'961		
15	Betelriedgraben	11.50	15'000-20'000	1'522		

Code	Analysebach	A_{EG} [km ²]	Geschiebefracht am Kegelhals [m ³]	Spezifische Geschiebefracht [m ³ /km ²]	Negativfaktoren	Bedeutende Ablagerungen
5	Schwarzbächli	3.50	5'000	1'429	GR	ja
3	Schwendibach	11.00	15'000	1'364		
19	Schwenditobel	2.40	2'000-3'700	1'188		ja
14	Milibach	3.90	25'000	641		ja
57	Milibach	3.80	1'300-1'800	408		
40	Ri di Bedretto	4.30	800-2'700	407		ja
42	Dongia	7.30	1'000-2'500	240		ja

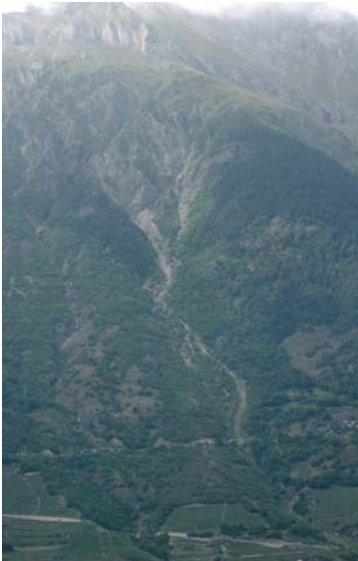


Abb. 9-3: Torrent de Saxé (52): Blick vom Gegenhang (oberes Foto) und Blick von oben (unteres Foto)

10 Entwicklung des Geschiebeabschätzverfahrens

Aus den beobachteten Mustern und Tendenzen, Erfahrungs- und Schwellenwerten in den Kap. 7 bis 9 wurde ein empirisches, systembasiertes und prozessorientiertes Geschiebeabschätzverfahren entwickelt, das in diesem Kapitel vorgestellt wird. Die Zielsetzung für dieses Geschiebeabschätzverfahren ist in Kap. 1.1.2 definiert.

10.1 Technische Daten

10.1.1 Zielpublikum

Das Zielpublikum zur Anwendung des hier vorgestellten Geschiebeabschätzverfahrens sind Expertinnen und Experten aus der Praxis z.B. entsprechend spezialisierte Geographen, Geomorphologen, Hydrologen, Geologen, Forstingenieure, Umweltingenieure etc, welche in ihrer täglichen Arbeit mit der Frage von Geschiebeabschätzungen in Wildbachsystemen konfrontiert sind und durch ihre Ausbildung und vor allem durch ihre Erfahrung bereits ein angemessenes Prozessverständnis für den Geschiebehaushalt in Wildbachsystemen mitbringen.

Das Geschiebeabschätzverfahren verlangt von der Anwenderin und vom Anwender ein aktives Vorgehen, Entscheiden und Mitdenken, indem er/sie mit Hilfe von guter Vorstellungskraft eigene rein qualitative Ereignisszenarien definiert. Diese können anschliessend mit dem Geschiebeabschätzverfahren „durchgespielt“ werden und es erfolgt eine Quantifizierung in Form von Geschiebebilanzen in Gerinneabschnitten und der Geschiebefracht am Kegelhals.

10.1.2 Anwendungsbereich

Das Geschiebeabschätzverfahren kann eingesetzt werden in voralpinen und alpinen Wildbachsystemen mit einer Einzugsgebietsfläche $< 10 \text{ km}^2$ und mittleren Gerinneneigungen von deutlich $> 10\%$, in denen mit aktiven Geschiebeverlagerungsprozessen zu rechnen ist.

10.1.3 Entwicklung und Validierung

Das Abschätzverfahren wurde an 58 detailliert analysierten Grossereignissen im Schweizer Alpenraum entwickelt. Um die Güte des Verfahrens zu testen, wurde es einerseits an 20 weiteren Grossereignissen, andererseits an 23 Abschätzungen anlässlich von Gefahrenbeurteilungen validiert. Dadurch liegen die Stärken und Schwächen sowie die Sensitivität des Verfahrens transparent und offen da.

10.1.4 Aussagebereich und Aussagegenauigkeit

Mit dem Geschiebeabschätzverfahren können je nach definierten Ereignisszenarien grundsätzlich Geschiebebilanzen in einzelnen Gerinneabschnitten und schliesslich die Geschiebefracht am Kegelhals bei 100 bis 300 jährlichen Ereignissen und bei sehr pessimistischen Szenarien im Bereich des EHQ abgeschätzt werden. Die Aussagegenauigkeit ist abhängig vom Detaillierungsgrad der Inputparameter, wie dies in Abb. 10-1 ersichtlich ist:

Erfolgt die gesamte Bearbeitung rein aufgrund von digitalen Inputparametern und ohne ergänzende Feldarbeit, ist die Aussagegenauigkeit beschränkt auf die **Gefahrenhinweisstufe** (vgl. Kap. 2.5.6.1 und vgl. Abb. 10-1 rechts). Die Ergebnisse der Geschiebeabschätzung sind in diesem Fall als Grundlage für eine Gefahrenbeurteilung im Rahmen von Gefahrenkartierungen oder zur Dimensionierung von Schutzbauten ungenügend, da sie dem minimalen Detaillierungsgrad nicht entsprechen (vgl. Kap. 2.5.6.1). In der Folge wird bei diesem Verfahren von der „**Schreibtisch-basierten**“ **Vorgehensweise** gesprochen.

Werden die digitalen Inputparameter durch Feldaufnahmen ergänzt, wird die Aussagegenauigkeit stark verbessert. Falls draussen vor Ort im Gelände Abschätzungen zur Auslösungswahrscheinlichkeit und erwarteten Geschiebekubaturen durch Hangprozesse, Aufnahmen zum Lockermaterialangebot in sämtlichen Gerinneabschnitten und Lokalisierungen potenzieller lokaler Ablagerungsstrecken erfolgen, werden diese anstelle der entsprechenden digitalen Grundlegedaten als Inputparameter implementiert. In diesem Fall können mit dem Geschiebeabschätzverfahren Aussagen auf **Gefahrenkarten-Stufe** gemacht werden (vgl. Abb. 10-1 links), die abgeschätzten Geschiebefrachten also als Grundlage für eine Gefahrenkartierung und für eine Projektierung von Schutzbauten verwendet werden. In der Folge wird bei diesem Verfahren von der „**Feld-ergänzten**“ **Vorgehensweise** gesprochen.

	Detaillierungsgrad der Inputparameter	
	Feld-ergänzt	Schreibtisch-basiert
	aus digitalen Grundlegedaten: <ul style="list-style-type: none"> • Karte • Luftbild • DHM • Primärflächen • Geologische Informationen ERGÄNZT MIT FELDAUFNAHMEN: <ul style="list-style-type: none"> • Mobilisierungswahrscheinlichkeit und potenzielle Lieferungsvolumina aus Hangprozessen • Lockermaterialangebot im Gerinne aller relevanten Gerinneabschnitte • Lokale Ablagerungsstellen, welche im digitalen Höhenmodell nicht sichtbar sind 	rein aus digitalen Grundlegedaten: <ul style="list-style-type: none"> • Karte • Luftbild • DHM • Primärflächen • Geologische Informationen
Aussagegenauigkeit	Stufe Gefahrenkarte	Stufe Gefahrenhinweiskarte

Abb. 10-1: Aussagegenauigkeit des Geschiebeabschätzverfahrens in Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad der Inputparameter

10.1.5 Benötigte Zeit zur Durchführung

Die Durchführungszeit für einen mittelgrossen Wildbach mit einer Fläche von ca. 2-5 km² hängt ab von der angestrebten Aussagegenauigkeit und somit vom Detaillierungsgrad der Inputparameter.

Bei einer Anwendung auf **Stufe Gefahrenhinweiskarte (= Schreibtisch-basiert)**, bei der keine Feldarbeit nötig ist, wird bei vorhandenen digitalen Grundlagedaten und Automatisierungstechniken im GIS mittels aml oder Python-Skripts für die Bereitstellung der Inputparameter und der Berechnung von 2-3 Szenarien von einer Durchführungszeit von rund **2 Stunden** ausgegangen. Der grösste Anteil der Zeit wird für die Bereitstellung der Inputparameter benötigt.

Bei der Anwendung auf **Stufe Gefahrenkarte**, wo die digitalen Grundlagedaten durch Feldaufnahmen ergänzt und ersetzt werden (**= Feld-ergänzt**), ist insgesamt mit einem Aufwand von **1 Tag** zu rechnen. Hier macht der grösste Anteil die Geländearbeit aus. Müssen mehrere Bäche am selben Ort beurteilt werden, verkürzt sich die Zeit deutlich, da die Geländearbeit zwischen den verschiedenen Bächen koordiniert und höhenmetertechnisch optimiert werden kann.

10.1.6 Erforderliche Software

Eine Zielsetzung unter anderen war (vgl. Kap. 1.1), dass das Geschiebeabschätzverfahren auch GIS-basiert durchgeführt werden kann. Diese Arbeit erfolgte auf der Basis von ESRI, die Anwendung mit anderer Software ist jedoch auch möglich. Dabei ist es am besten, wenn rasterbasierte Berechnungen durchgeführt werden können und somit im Fall von der Software ESRI der „Spatial Analyst“ und der „3D Analyst“ vorhanden sind. Kleineren privaten Büros, für welche sich die Anschaffung dieser Lizenzen nicht lohnt, werden jedoch nur die Grundversion des Programms „Arc Map“ haben und deshalb nur vektorbasierte Berechnungen durchführen können. Dieser Einschränkung wurde versucht Rechnung zu tragen, indem auch Lösungen zur Berechnung der Inputdaten für vektorbasierte GIS-Anwendungen präsentiert werden.

Das Geschiebeabschätzverfahren wurde pragmatisch in einem Microsoft Excel-File programmiert und automatisiert, damit die Anwendung möglichst effizient erfolgen kann. Dieses automatisierte Geschiebeabschätzverfahren ist auf der CD als File „Geschiebeabschätzverfahren_Gertsch.xls“ abgespeichert.

10.2 Aufbau und Struktur

In Abb. 10-2 ist ein Schema des Ablaufs einer Geschiebeabschätzung mittels dem Abschätzverfahren abgebildet. Die einzelnen Arbeitsschritte werden in der Folge detailliert beschrieben. Hier wird zuerst ein grober Überblick gegeben:

In einem ersten Schritt erfolgt die Grundlagenbeschaffung, welche sich je nach geplanter Durchführung der Geschiebeabschätzung anders gestaltet. Danach gilt es, mit Hilfe der Grundlagedaten im GIS die geschieberelevanten Gerinneabschnitte zu definieren und abzugrenzen. Danach werden pro Gerinneabschnitt die erforderlichen Inputparameter extrahiert, damit sie in die Eingabemaske des Abschätzverfahrens eingefügt werden können. Nun erfolgt für die/den Anwender/in die Aufgabe, sich rein qualitativ mögliche Ereignisszenarien zu überlegen und zu definieren. Diese werden anschliessend pro Gerinneabschnitt mit Hilfe von verschiedenen Be-

urteilungsinstrumenten für die Hangprozesse und für die Gerinneprozesse durchgespielt. Dabei erfolgt eine quantitative Abschätzung der Geschiebebilanz pro Gerinneabschnitt in Abhängigkeit vom definierten Ereignisszenario. Zum Schluss werden die Geschiebebilanzen aller Gerinneabschnitte bis zum Kegelhal aufsummiert und es resultiert eine Abschätzung der Geschiebefracht am Kegelhal.

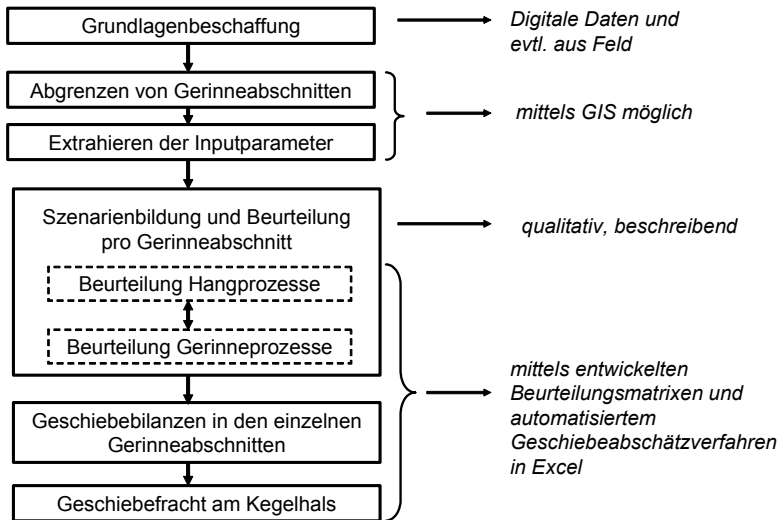


Abb. 10-2: Ablaufschema des Geschiebeabschätzverfahrens

10.3 Grundlagenbeschaffung

Die Grundlagenbeschaffung (vgl. Tab. 10-1) richtet sich nach dem geplanten Vorgehen und der Möglichkeiten betreffend GIS. Vier verschiedene Vorgehensweisen werden unterschieden:

- GIS rasterbasiert, mit ergänzender Feldarbeit (Vorgehensweise Art 1)
- GIS vektorbasiert, mit ergänzender Feldarbeit (Vorgehensweise Art 2)
- GIS rasterbasiert, am Schreibtisch (Vorgehensweise Art 3)
- GIS vektorbasiert, am Schreibtisch (Vorgehensweise Art 4)

Tab. 10-1: Zu beschaffende Grundlegendaten in Abhängigkeit von der geplanten Vorgehensweise

	Art 1	Art 2	Art 3	Art 4
Vorgehensweise	GIS Raster Feld-ergänzt	GIS Vektor Feld-ergänzt	GIS Raster Schreibtisch-basiert	GIS Vektor Schreibtisch-basiert
Aussagegenauigkeit	GK-Stufe	GK-Stufe	GHK-Stufe	GHK-Stufe
Digitale Grundlagen	LK 1:25'000 Orthofotos DHM (div. möglich) Evtl. Geol. Karte	LK 1:25'000 Orthofotos Evtl. Geo. Karte	LK 1:25'000 Orthofotos DHM (div. möglich) Primärflächen Evtl. Geol. Karte	LK 1:25'000 Orthofotos Primärflächen Evtl. Höhenkurven Evtl. Geol. Karte
Feldaufnahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Lockermaterialangebot in allen Gerinneabschnitten • Begutachtung Hänge bezüglich Mobilisierung und Volumen potenzieller Hangprozesse • Begutachtung von kleinräumigen lokalen Ablageungsstellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Lockermaterialangebot in allen Gerinneabschnitten • Begutachtung Hänge bezüglich Mobilisierung und Volumen potenzieller Hangprozesse • Begutachtung von kleinräumigen lokalen Ablageungsstellen 	-	-

Die zu beschaffenden Grundlagendaten unterscheiden sich zwischen der rasterbasierten und vektorbasierten Vorgehensweise insbesondere durch das DHM. In der rasterbasierten Anwendung können wichtige Inputparameter einfach und rasch mittels eines digitalen Höhenmodells berechnet werden, während dies bei der vektorbasierten Anwendung nicht möglich ist. Für die rasterbasierte Anwendung wurden verschiedene digitale Höhenmodelle getestet (Zingg 2007). Dabei zeigte sich, dass für die Inputdaten in das Geschiebeabschätzverfahren grundsätzlich das DHM25 (wenn es trotz der Generalisierung die Fliesswege korrekt angibt) oder das DHM10 ausreichend sind. Laserscan-Daten (in der Schweiz DTM-AV) können ebenfalls eingesetzt werden, jedoch sind der zeitliche Aufwand und der benötigte Speicherplatz nicht zu unterschätzen.

Die Schreibtisch-basierte Vorgehensweise unterscheidet sich dahingehend von der Feldergänzten Vorgehensweise, dass die Abschätzung des Lockermaterialangebots im Gerinne und Hang auf den digitalen Grundlagedaten Primärfläche kombiniert mit allfälligen geologischen Informationen basiert. Auch die Abschätzung des potenziellen Geschiebeinputs aus dem Hang wird aufgrund dieser Informationen ermittelt und ist daher im Vergleich zu Geländeaufnahmen sehr unsicher. Dies führt dazu, dass die Aussagegenauigkeit nicht über die Gefahrenhinweis-Stufe kommt. Auch lokale Ablagerungen werden bei der Schreibtisch-basierten Methode einzig und alleine aufgrund des Höhenmodells definiert.

10.4 Abgrenzung von Gerinneabschnitten

Die Arbeitsschritte „Abgrenzung von Gerinneabschnitten“ (Kap. 10.4) sowie „Extrahieren der Inputparameter“ (Kap. 10.5) können bei der Anwendung des Abschätzverfahrens mittels GIS aus den digitalen Grundlagendaten durchgeführt werden, müssen aber nicht. Methodische Lösungswege und Anleitungen für diese Bearbeitung im GIS sind in Anhang B beschrieben. Dabei wird für jede der 4 in Tab. 10-1 vorgestellten Vorgehensweisen eine Lösung präsentiert.

10.4.1 Abgrenzung der Einzugsgebietsfläche

Um die Systemgrenze zu definieren, muss in einem ersten Schritt das hydrologische Einzugsgebiet des zu beurteilenden Wildbachsystems abgegrenzt werden. Der Kegelhals bildet den tiefsten Punkt (vgl. auch Anhang B).

10.4.2 Festlegen pot. Erstabschnitts-Startpunkte und Abgrenzung des Gerinnesystems

Zuerst geht es darum, die potenziellen Gerinneabschnitte gegen oben im Einzugsgebiet abzugrenzen und die Startpunkte möglicher Erstabschnitte im Gerinnenetz zu definieren (vgl. auch Anhang B). Als Startpunkte werden in allen Seiten- und Hauptgerinnen diejenigen Punkte markiert, die als oberste Punkte in ihrem Gerinneast alle folgenden Bedingungen erfüllen:

- Das Gerinnegefälle in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche oberhalb ist grösser als das Grenzgefälle gemäss der Formel $J_{\text{start}} = -4.86 * A_{\text{EG}} + 18.6$ (mit $A_{\text{EG}} > 0.025 \text{ km}^2$) (vgl. Kap. 8.2.1.1)
- Das Gerinne ist in der Landeskarte 1 : 25'000 mindestens als Trockenrunse symbolisiert
- Auf dem Orthofoto oder im Gelände sind deutliche Spuren eines offenen, unbewachsenen Gerinnes mit allenfalls Erosionsspuren zu finden.

10.4.3 Abgrenzung der einzelnen Gerinneabschnitte

Nachdem die obersten Punkte im Gerinnenetz definiert sind, wird das Gerinnenetz gegen unten hinsichtlich möglicher Abgrenzungen der Gerinneabschnitte betrachtet. Kriterien zur Festlegung einer Grenze eines Gerinneabschnitts sind:

- **Gerinnenetz:** Bei Einmündungen von Seitengerinnen wird ein Gerinneabschnitt abgegrenzt und unterhalb davon ein neuer begonnen.
- **Lockermaterialangebot:** Bei sich verändernden Bedingungen des Lockermaterialangebots wird ein Gerinneabschnitt abgegrenzt. Es werden die Klassen LMUL (Lockermaterial unlimitiert), VB (Querverbau, Sperren), LML (Lockermaterial limitiert) und F (anstehender fester Fels) unterschieden.
- **Gerinneneigung:** Bei sich verändernden Verhältnissen der Gerinneneigung wird ein Gerinneabschnitt abgegrenzt. Dabei soll darauf geachtet werden, dass in etwa die Klassen 0-10%, 10-20%, 20-40% und > 40% voneinander abgegrenzt werden können.

Grundsätzlich sollen in einem Wildbachsystem < 10 km² mindestens 2 und maximal 12 Gerinneabschnitte abgegrenzt werden. Zudem sollten ausser bei Gerinneabschnitten mit einer Gerinneneigung < 10% möglichst keine Gerinneabschnitte < 100m Länge abgegrenzt werden. Diese Einschränkung soll dazu führen, dass „grosszügig“ generalisiert wird und man sich auf das Wesentliche beschränkt und nicht im Detail verliert. Bei Wildbachsystemen mit grossen Einzugsgebietsflächen kann diese Einschränkung auch dazu führen, dass einzelne Seitengerinne nicht berücksichtigt werden können. Die Erfahrung aus den Ereignisanalysen hat aber gezeigt, dass mit zunehmender Einzugsgebietsgrösse nicht mehr alle Seitenzubringer aktiv sind. Die Gerinneabschnitte werden anschliessend so nummeriert, dass kein Gerinneabschnitt mit höherer Nummer in einen Gerinneabschnitt mit tieferer Nummer fliesst.

Vorschläge für ein GIS-basiertes Vorgehen dieses Arbeitsschritts sind in Anhang B ersichtlich.

10.5 Extrahieren der Inputparameter

Nachdem die Gerinneabschnitte definiert sind, geht es darum, die für das Abschätzverfahren nötigen Inputparameter zu extrahieren und so aufzubereiten, dass sie anschliessend in einer Liste als Eingabewerte vorliegen.

Für die Feld-ergänzte Durchführung der Geschiebeabschätzung sind die folgenden Eingabewerte pro Gerinneabschnitt nötig (Anleitung zur Herleitung mittels GIS vgl. Anhang B):

- Gerinneabschnittsnummer
- Einzugsgebietfläche oberhalb des Gerinneabschnitts beim obersten Punkt des Gerinneabschnitts A_{EG} [km²]
- Lockermaterialangebot im Gerinneabschnitt codiert (Lockermaterialangebot unlimitiert LMUL = 1, Verbau, Sperren VB = 2, Lockermaterialangebot limitiert LML = 3, Fels F = 4)
- Höhe über Meer des obersten Punkts im Gerinneabschnitt [m ü. M.]
- Horizontale Länge l des Gerinneabschnitts [m]

Für die Schreibtisch-basierte Durchführung der Geschiebeabschätzung sind zusätzlich noch die folgenden, den Hang beschreibenden Eingabewerte pro Gerinneabschnitt nötig (vgl. Anhang B, Schreibtisch-basierte Vorgehensweisen):

- H_{100} : Gesamtfläche der in den Gerinneabschnitt mündenden Seitenhänge mit maximaler Distanz zur Gerinneachse eines Gerinneabschnitts von 100 m [km²]
- H_{pot} : Teilfläche von H_{100} , welche eine Hangneigung zwischen 20° und 48° und keinen anstehenden Fels aufweist [km²]
- H_F : Teilfläche von H_{100} , welche aus anstehendem Fels besteht [km²]

10.6 Szenarienbildung

Um mit dem in dieser Arbeit entwickelten Geschiebeabschätzverfahren arbeiten zu können, müssen sich Experten/innen als erstes Gedanken darüber machen, welche Ereignisszenarien sie durchrechnen möchten.

„Wegen der grossen Vielfalt und Komplexität der möglichen Prozessabläufe muss bei der Gefahrenbeurteilung mit Szenarien gearbeitet werden. Szenarien stehen stellvertretend für mögliche Ereignisse und Ereignisabfolgen. Im Zusammenhang mit Naturgefahren dienen Szenarien der Darstellung einer repräsentativen Auswahl möglicher Dispositionen, Auslösebedingungen und –vorgängen sowie möglichen Ereignissen und Ereignisketten. Szenarien bedeuten Vereinfachung und Beschränkung auf das Wesentliche. Szenarienbildung bedeutet in einem ersten Schritt die Suche nach wichtigen möglichen Ereignisketten.“

Trotz guten wissenschaftlichen Grundlagen, guten Schätz- und Berechnungsmodellen und technischen Hilfsmitteln sind letztlich für die Qualität von Gefahrenbeurteilungen möglichst klare Vorstellungen über die potenziellen Prozessabläufe entscheidend. Anders ausgedrückt: Die Qualität von Gefahrenbeurteilungen steht und fällt mit der Wahl und Berücksichtigung von adäquaten Szenarien“ (Kienholz et al. 2008)

Dabei soll der/die Expertin ausdrücklich mehrere verschiedene Szenarien definieren und diese gedanklich sowie vom erwarteten Ausmass her ordnen. Mit diesen Überlegungen im Kopf kann er/sie anschliessend zur Beurteilung und Quantifizierung dieser Szenarien bezüglich der dabei gelieferten Geschiebefrachten schreiten. Die Beurteilungsschritte zur quantitativen Bewertung dieser Szenarien sind in den folgenden Kapiteln ersichtlich.

10.7 Eingabe der Inputparameter

Für die effiziente Durchführung einer Geschiebeabschätzung mittels des hier vorgestellten Geschiebeabschätzverfahrens wurde ein Excel-File programmiert. Es ist auf der beigelegten CD als Vorlage „Geschiebeabschätzverfahren_Gertsch.xls“ abgespeichert und kann somit auch digital betrachtet werden. Im File befinden sich 5 Tabellenblätter (vgl. Abb. 10-3):



Abb. 10-3: Tabellenblätter des Geschiebeabschätzverfahrens in Excel

In der Eingabemaske werden die erforderlichen Inputparameter eingegeben. Das Vorgehen zur Beschaffung der Grundlegendaten zur Eingabe der benötigten Inputparameter wurde in den Kap. 10.3 bis 10.5 beschrieben.

Für die Eingabe in der Eingabemaske (vgl. Abb. 10-4) und auch allgemein im gesamten automatisierten Geschiebeabschätzverfahren zählt der allgemeine Grundsatz, dass in den orange eingefärbten Zellen Eingaben gemacht werden müssen und in den grauen Zellen automatische Berechnungen erfolgen. Als Hilfe sind bei einigen Feldern Kommentare eingefügt, die der/dem Benutzer/in angeben, was sie/er eingeben muss und welches der gültige Wertebereich ist.

A		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Eingabemaske																			
2																				
3	Bach, Gemeinde:		Tellenbach, Samen																	
4	Szenariobeschreibung:		SZP, Murgänge und Hangprozesse																	
5	Bearbeiter/in, Datum:		Eva Gertsch, 18.11.2008																	
6	Anzahl Gerinneabschnitte:		6																	
7	Vorgehensweise: GIS-Raster Feld-ergänzt "1" GIS-Vektor Feld-ergänzt "2" GIS-Raster Schreibtisch-basiert "3" GIS-Vektor Schreibtisch-basiert "4"		1																	
8																				
9	Inputparameter Gerinne										Inputparameter Hang									
10	Gerinneabschnitt	Anzahl GA, die in diesen GA einmünden	GA oberhalb 1	GA oberhalb 2	GA oberhalb 3	GA oberhalb 4	GA unterhalb	MEG [mm ²]	LM-Angebot	Höhe [m] am obersten Punkt	Länge GA [m]	Höhendifferenz [m]	mittlere Gerinneveigung [%]	schiefe Länge l _s [m]	JGA / JGAob [-]	H100 [mm ²]	Hpot[mm ²]	HF [mm ²]	Hpot / H100	HF / H100
11	1	0					3	0.0151	3	1296	885	433	48.9	985.248	1				#DIV/0!	#DIV/0!
12	2	0					3	0.0163	3	1136	524	273	52.1	590.851	1				#DIV/0!	#DIV/0!
13	3	2	1	2			4	0.1387	1	863	726	132	18.2	737.902	0.4				#DIV/0!	#DIV/0!
14	4	1	3				5	0.3394	1	731	115	11	9.6	115.525	0.5				#DIV/0!	#DIV/0!
15	5	1	4				6	0.3456	1	720	131	23	17.6	133.004	1.8				#DIV/0!	#DIV/0!
16	6	1	5				Kegelhals	0.8603	3	697	732	199	27.2	758.568	1.5				#DIV/0!	#DIV/0!
17	7																		#NV	#NV
18	8																		#NV	#NV
19	9																		#NV	#NV
20	10																		#NV	#NV
21	11																		#NV	#NV
22	12																		#NV	#NV
23	Kegelhals									498									#NV	#NV

Abb. 10-4: Eingabemaske im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

Zuerst wird die Kopfzeile mit den folgenden Angaben ausgefüllt:

- **Bachname** und **Gemeindename** einmalig eintragen
- Das bei dieser Berechnung gewählte **Szenario beschreiben**
- **Bearbeiter/in** und **Datum** der Berechnung eintragen
- **Anzahl Gerinneabschnitte**, die abgegrenzt wurden (vgl. Kap. 10.4.3) eintragen. Nach diesem Eintrag werden in der Eingabemaske automatisch diejenigen Zellen orange eingefärbt, bei denen pro Gerinneabschnitt eine Eingabe gemacht werden muss.
- Methodische **Vorgehensweise** wählen. Es kann zwischen den 4 Möglichkeiten GIS-Raster Feld-ergänzt (1), GIS-Vektor Feld-ergänzt (2), GIS-Raster Schreibtisch-basiert (3) und GIS-Vektor Schreibtisch-basiert (4) gewählt werden. Wenn die Vorgehensweisen 3 oder 4 (Schreibtisch-basiert) gewählt werden, werden bei der Eingabemaske zusätzlich die erforderlichen Inputparameter zur Berechnung der Hangprozesse aktiv, resp. orange eingefärbt. Bei der Wahl der Vorgehensweise 1 oder 2 hingegen, bleiben diese Zellen inaktiv, da die Abschätzungen zur Auslösung von Hangprozessen aus den Geländeanalysen erfolgen.

Anschliessend können die eigentlichen Eingaben zu den einzelnen Gerinneabschnitten gemacht werden. Diese sind:

- **Räumliche Verknüpfung der einzelnen Gerinneabschnitte:** Die maximal 12 Gerinneabschnitte pro Bach müssen in einem ersten Schritt räumlich verknüpft werden. Bei jedem Gerinneabschnitt wird darum angegeben, wie viele und welche Gerinneabschnitte direkt in ihn fliessen und in welchen Gerinneabschnitt er selber fliesst. Dies erfolgt in den Spalten B bis G.
- **Inputparameter zur Beschreibung der lokalen Standortfaktoren im Gerinne:** Diese Inputparameter wurden je nach Vorgehensweise in den Vorarbeiten bereitgestellt (vgl. Kap. 10.5) und können nun auf einfache Art und Weise in die Eingabemaske hinein kopiert werden. In Spalte H wird die Einzugsgebietsfläche oberhalb jedes Gerinneabschnitts A_{EG} [km²] eingetragen und in Spalte I das Lockermaterialangebot pro Gerinneabschnitt gemäss der Codierung (1 = LMUL, 2 = VB, 3 = LML, 4 = F). Die mittlere Gerinneneigung J_{GA} [%] wird nicht direkt eingetragen, sondern vom System über andere Inputparameter automatisch berechnet. Die hierzu erforderlichen Inputparameter sind die Meereshöhe [m ü. M.] am obersten Punkt jedes Gerinneabschnitts und die horizontale Länge des Gerinneabschnitts [m] in den Spalten J und K. Mit diesen Werten und unter Berücksichtigung der räumlichen Verknüpfung werden die Höhendifferenz im GA [m], die mittlere Gerinneneigung J_{GA} [%] sowie die schiefe Länge l_S [m] automatisch berechnet und in den Spalten L bis N aufgelistet. Auch das Verhältnis J_{GA}/J_{GAob} , welches die „Bedingungen oberhalb“ repräsentiert, wird automatisch berechnet und in Spalte O dargestellt.
- **Inputparameter zur Abschätzung des maximal möglichen Hanginputs bei Schreibtisch-basierter Vorgehensweise:** Falls die Schreibtisch-basierte Vorgehensweise gewählt wird, werden in den Spalten P, Q und R pro Gerinneabschnitt die entsprechenden Flächen und Teilflächen der Inputparameter H_{100} , H_{pot} und H_F eingefügt. Die Verhältnisse H_{pot}/H_{100} resp. H_F/H_{100} werden nach der Eingabe automatisch berechnet und in den Spalten S und T dargestellt.

10.8 Beurteilung der Hangprozesse mittels Hang-Beurteilungsmatrix

10.8.1 Bestimmen der aus dem Hang gelieferten Kubatur

Bei den Auswertungen in Kap. 7.2 zeigte sich, dass die Abschätzung von Auslösepunkten von Rutschungen und der dabei gelieferten Kubatur nicht einfach ist. Trotzdem muss eine Abschätzung der gelieferten Kubatur in einen Gerinneabschnitt erfolgen und als Inputparameter im Abschätzverfahren eingegeben werden.

Falls diese Abschätzungen im Feld erfolgen (Feld-ergänzte Vorgehensweise), können Spuren im Gelände wie beispielsweise bereits abgegangene Rutschungen, kleinräumige Geländeformen, schräg gestellte Bäume, Zugrisse, Vernässungen etc. miteinbezogen werden. Die Auslösewahrscheinlichkeit und dabei gelieferte Kubatur wird anschliessend gutachterlich festgelegt und auch so in das Abschätzverfahren implementiert.

Bei der Beurteilung ohne Feldarbeit (Schreibtisch-basiert) ist dies nicht möglich. Einzige Hinweise für die Abschätzung geben die Konsultation der Topographischen Karte, des Orthofotos und des Ereigniskatasters. Als weitere Hilfeleistung für eine sehr grobe Eingrenzung von maxi-

mal möglichen gelieferten Kubaturen aus dem Hang, wurde die Grenztabelle in Abb. 10-5 erstellt. Sie bildet eine Verallgemeinerung der Erkenntnisse aus Kap. 7.2.2, Abb. 7-9 und Abb. 7-10, in denen durch die Bildung der Verhältnisse H_{pot}/H_{100} und H_{F}/H_{100} versucht wurde, maximal mögliche Lieferungsvolumina aus dem Hang abzugrenzen.

		H_{F}/H_{100}		
		>0.4	0.4 - 0.01	0.01 - 0
H_{pot}/H_{100}	0 – 0.2	0 m ³	0 m ³	0 m ³
	0.2 – 0.6	0 m ³	1'000 m ³	5'000 m ³
	0.6 - 1	0 m ³	10'000 m ³	Keine Grenze

H_{100} Gesamtfläche der in den Gerinneabschnitt mündenden Seitenhänge mit maximaler Distanz zur Gerinneachse eines Gerinneabschnitts von 100 m [km²]

H_{F} Teilfläche von H_{100} , welche aus anstehendem Fels besteht [km²]

H_{pot} Teilfläche von H_{100} , welche eine Hangneigung zwischen 20° und 48° und keinen anstehenden Fels besitzt [km²]

Abb. 10-5: Maximal möglicher Geschiebeinput durch Rutschungen und Rensen in einen Gerinneabschnitt in Abhängigkeit von den Verhältnissen H_{pot}/H_{100} und H_{F}/H_{100}

Der/die Anwender/in kann die beiden Verhältnisse H_{pot}/H_{100} und H_{F}/H_{100} durch GIS-Analysen herleiten und in dieser Tabelle Hinweise über den maximal möglichen Geschiebeinput aus dem Hang in den Gerinneabschnitt erhalten. Es gilt zu bemerken, dass die Werte in Abb. 10-5 obere Grenzwerte und nicht Mittelwerte der gelieferten Volumina darstellen. Es wäre somit falsch, in jedem Gerinneabschnitt die Werte in Abb. 10-5 als tatsächlichen Geschiebeinput zu wählen. Erstens wird während Grossereignissen mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht in jedem Gerinneabschnitt Geschiebe aus dem Hang geliefert und zweitens ist meistens nicht mit der ganzen, maximal möglichen Lieferungskubatur zu rechnen. Die Wahl der Kubatur aus dem Hang liegt somit im Ermessensspielraum der Anwenderin oder des Anwenders und die Grenzwerte in Abb. 10-5 sind lediglich als Leitplanken zur Abgrenzung der oberen Bandbreite zu erachten.

Der Hanginput durch Runsenerosion wird pauschal unter der Angabe einer Kubatur in m³ zur allfälligen Kubatur durch Rutschungen hinzugefügt.

10.8.2 Beurteilung der Mobilisierung im Gerinne mittels Hang-Beurteilungsmatrix

Nachdem die aus dem Hang in den zu beurteilenden Gerinneabschnitt gelieferte Kubatur abgeschätzt wurde, folgt nun die Beurteilung zur Mobilisierung dieser gelieferten Kubatur im Gerinne. Dazu wurde eine umfassende Hang-Beurteilungsmatrix entwickelt (vgl. Abb. 10-6 oder Anhang C). Die Hang-Beurteilungsmatrix ist eingeteilt in je einen Beurteilungsbereich pro Lieferungskubatur-Klasse, dabei wurden die folgenden Klassen unterteilt:

- Kubatur 0-1'000 m³
- Kubatur 1'000-2'000 m³
- Kubatur 2'000-5'000 m³
- Kubatur 5'000-10'000 m³
- Kubatur 10'000-20'000 m³
- Kubatur >20'000 m³

Mit der Abschätzung der gelieferten Kubatur aus dem Hang geht der/die Anwender/in nun also in der Hang-Beurteilungsmatrix zu demjenigen Block, welcher mit der entsprechenden Lieferungskubatur übereinstimmt und führt die Beurteilung der Mobilisierung im Gerinne durch. Diese Beurteilung besteht aus einem 2-stufigen Verfahren, einer Grobabschätzung und einer Feinabschätzung, welche bei Bedarf angewendet werden kann.

Grobabschätzung

Die **Grobabschätzung** zur Mobilisierung im Gerinne befindet sich jeweils im linken Teil der Beurteilungsmatrix (vgl. Abb. 10-6) und erfolgt aufgrund der Einzugsgebietsfläche A_{EG} und der Gerinneneigung J_{GA} im Gerinneabschnitt. Dazu wurde für jede Lieferungskubatur-Klasse ein speziell angepasstes Diagramm entwickelt. Die Einzugsgebietsfläche ist auf der X-Achse aufgetragen und die Gerinneneigung auf der Y-Achse. Die Bedingungen im betreffenden Gerinneabschnitt können im Diagramm der entsprechenden Hang-Lieferungs-Kubatur eingetragen werden und es resultiert eine erste Grobabschätzung zur Mobilisierung dieser Kubatur im Gerinne in Form eines Bereichs im Diagramm:

- Im **weissen** Bereich sind die Bedingungen im Gerinneabschnitt bezüglich Gerinneneigung und Einzugsgebietsfläche so mobilisierungsfördernd, dass ohne weitere Abklärungen davon ausgegangen werden kann, dass die ganze Kubatur aus dem Hang im Gerinne vollmobilisiert wird.
- Im **hellgrauen** Bereich sind die Bedingungen unsicher und es kann mit der Grobabschätzung nicht definitiv geklärt werden, ob die gesamte Kubatur im Gerinne mobilisiert werden kann oder nicht. Deshalb muss die Feinabschätzung erfolgen.
- Im **dunkelgrauen** Bereich sind die Bedingungen der Gerinneneigung und der Einzugsgebietsfläche derart limitierend, dass grundsätzlich mit einer Teilmobilisierung gerechnet werden muss. Wie gross diese sein wird, muss auch hier die Feinabschätzung entscheiden.

Die Grenzen dieser Bereiche sind in jeder Kubatur-Klasse anders und verschieben sich mit steigender Lieferungskubatur gegen oben. Dies heisst, dass bei gleichen Bedingungen betreffend Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung im Gerinneabschnitt bei einem kleinen Geschiebeinput aus dem Hang eher eine Vollmobilisierung stattfindet als bei einem grossen Geschiebeinput.

Grobabschätzung		Feinabschätzung																																																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15																																								
Kubatur aus Hang 0-1'000 m ³		1A	Negativfaktoren: - KW, FW, 3HG bis und mit od. VK bis GA: 3* ←, ↓ - andere NF oder keine NF bis und mit GA: ↓																																																					
		1B	Transportprozess im GA: GT: →, ↓ MG: ↓																																																					
		1C	Sperrren (VB) im GA: ja: →, ↓ nein: ↓																																																					
		1D	E-I _{akk} vor Eintritt in GA: 0-5: ↓7A 5-20: ←, ↓7A 20-50: 2*←, ↓7A >50: 3*←, ↓7A																																																					
Kubatur aus Hang 1'000-2'000 m ³		2A	Negativfaktoren: - KW, FW, 3HG bis und mit od. VK bis GA: 3* ←, ↓ - andere NF oder keine NF bis und mit GA: ↓																																																					
		2B	Transportprozess im GA: GT: →, ↓ MG: ↓																																																					
		2C	Sperrren (VB) im GA: ja: →, ↓ nein: ↓																																																					
		2D	E-I _{akk} vor Eintritt in GA: 0-5: ↓7A 5-20: ←, ↓7A 20-50: 2*←, ↓7A >50: 3*←, ↓7A																																																					
Kubatur aus Hang 2'000-5'000 m ³		3A	Negativfaktoren: - KW, FW, 3HG bis und mit od. VK bis GA: 3* ←, ↓ - andere NF oder keine NF bis und mit GA: ↓																																																					
		3B	Transportprozess im GA: GT →, ↓ MG ↓																																																					
		3C	Sperrren (VB) im GA: ja: →, ↓ nein: ↓																																																					
		3D	E-I _{akk} vor Eintritt in GA: 0-5: ↓ 5-20: ← ↓ 20-50: 2*← ↓ >50: 2*←, ↓ 3E Anzahl Inputstellen: 1: →, ↓7A 2: ↓7A >2: ←, ↓7A																																																					
Kubatur aus Hang 5'000-10'000 m ³		4A	Negativfaktoren: - KW, FW, 3HG bis und mit od. VK bis GA: 2* ←, ↓ - andere NF oder keine NF bis und mit GA: ↓																																																					
		4B	Transportprozess im GA: GT: 2* →, ↓ MG ↓																																																					
		4C	Sperrren (VB) im GA: ja: →, ↓ nein: ↓																																																					
		4D	E-I _{akk} vor Eintritt in GA: 0-5: ↓ 5-20: ← ↓ 20-50: 2*← ↓ >50: 2*←, ↓ 4E Anzahl Inputstellen: 1: →, ↓ 2: ↓ >2: ←, ↓																																																					
Kubatur aus Hang 10'000-20'000 m ³		5A	Negativfaktoren: - KW, FW, 3HG bis und mit od. VK bis GA: ←, ↓ - andere NF oder keine NF bis und mit GA: ↓																																																					
		5B	Transportprozess im GA: GT: 3* →, ↓ MG ↓																																																					
		5C	Sperrren (VB) im GA: ja: →, ↓ nein: ↓																																																					
		5D	E-I _{akk} vor Eintritt in GA: 0-5: ↓ 5-20: ↓ 20-50: ← ↓ >50: 2*←, ↓ 5E Anzahl Inputstellen: 1: 2*→, ↓ 2: →, ↓ >2: ↓																																																					
Kubatur aus Hang >20'000 m ³		6A	Negativfaktoren: - KW, FW, 3HG bis und mit od. VK bis GA: ←, ↓ - andere NF oder keine NF bis und mit GA: ↓																																																					
		6B	Transportprozess im GA: GT: 4* →, ↓ MG ↓																																																					
		6C	Sperrren (VB) im GA: ja: →, ↓ nein: ↓																																																					
		6D	E-I _{akk} vor Eintritt in GA: 0-5: ↓ 5-20: ↓ 20-50: ← ↓ >50: ←, ↓ 6E Anzahl Inputstellen: 1: 2*→, ↓ 2: →, ↓ >2: ↓																																																					
Legende □ Vollmobilisierung VM □ gehe zu 7A Spalten 1-5 ◐ Teilmobilisierung TM oder Vollmobilisierung VM Start Feinabschätzung Spalte 5 ◑ Teilmobilisierung TM Start Feinabschätzung Spalte 9		Mobilisierungs-Faktor im Gerinne																																																						
		1					1					0.9					0.8					0.7					0.6					0.5					0.4					0.3					0.2					0.1				
		Voll-					mobilisierung					Teil-					mobilisierung					(Anteil Hanginput)																																		

Geschiebeabschätzverfahren nach Gertsch (2009)
Hang-Beurteilungsmatrix

3HG = Mündung mehrerer Gerinne; A_{EG} = Einzugsgebietsfläche oberhalb GA [km²]; E-I_{akk} = akkumulierter Energie-Index;
 FW = Flutwelle; GA = zu beurteilender Gerinneabschnitt; GT = Geschiebetrieb; J_{GA} = mittlere Gerinneneigung im GA [%];
 KW = Kluftwasser; MG = Murgang; NF = Negativfaktor; VB = Querverbau im Gerinne; VK = Verklauung

Abb. 10-6: Hang-Beurteilungsmatrix

Feinabschätzung

Die **Feinabschätzung** erfolgt auf der rechten Seite der Beurteilungsmatrix (vgl. Abb. 10-6). Die Feinabschätzung beinhaltet pro Kubatur-Klassen-Block aus dem Hang mehrere Zeilen, in denen die relevanten Einflussfaktoren auf die Mobilisierung im Gerinne hin beurteilt werden. Es sind dies:

- Abflussbeeinflussende Negativfaktoren oberhalb oder im Gerinneabschnitt: falls vorhanden, wirken diese eher vollmobilisierend.
- Transportprozess im Gerinne von oben herkommend oder gebildet durch diesen Hangprozess: Murgangtransport wirkt eher vollmobilisierend, Geschiebetrieb eher teilmobilisierend.
- Sperrern im Gerinne: wirken aufgrund des abgetreppten Längenprofils eher teilmobilisierend
- Akkumulierter Energie-Index $E-I_{akk}$ im Gerinneabschnitt: hohe $E-I_{akk}$ Werte wirken eher vollmobilisierend.
- Anzahl der Inputstellen des Hanginputs in den Gerinneabschnitt: räumliche und zeitliche Verteilung bei mehreren Inputstellen wirkt eher vollmobilisierend, Einzelrutschungen eher teilmobilisierend.
- Mündungswinkel des Geschiebeinputs aus dem Hang im Vergleich zur Gerinneachse: wirkt sich einerseits aus auf mögliche Verklausungen und damit auf die Mobilisierung. Verklausungen sind eher vollmobilisierend, während keine Verklausungen eher teilmobilisierend wirken.

Bei der Beurteilung wird nun im entsprechenden Kubatur-Klassen-Block Frage um Frage, resp. Zeile um Zeile bearbeitet und das Ergebnis pro Zeile mittels einer Beurteilungslinie im Gitter der Matrix dargestellt. Je nach Beurteilung erfolgt in der Matrix eine Verschiebung gegen links oder gegen rechts. Diese Verschiebungsbeträge sind bei den Beurteilungskriterien durch Pfeile angegeben. \rightarrow bedeutet, dass in der Beurteilungsmatrix 1 Feld nach rechts gesprungen werden muss, $3*\rightarrow$ drei Felder. \downarrow bedeutet, dass man die Beurteilungslinie eine Zeile nach unten verschieben muss und somit zum nächsten Beurteilungskriterium übergeht. Je weiter links man am Ende der letzten Beurteilungszeile in der Beurteilungsmatrix liegt, umso eher wird die gesamte Kubatur im Gerinne vollmobilisiert. Je weiter rechts man liegt, umso weniger Geschiebe wird mobilisiert. Die Startzelle für das Durcharbeiten in der Bewertungsmatrix der Feinabschätzung ist abhängig vom Ergebnis der Grobabschätzung. Wenn die Grobabschätzung im hellgrauen Bereich liegt, erfolgt der Start eher links (Spalte 5), also eher auf der Seite der Vollmobilisierung, im dunkelgrauen Fall weiter rechts (Spalte 9), da bereits von Beginn weg mit einer Teilmobilisierung gerechnet wird.

Wichtig ist, dass sich sowohl die Anzahl als auch das Gewicht der verschiedenen Einflussfaktoren pro Kubatur-Klasse ändern (vgl. auch Abb. 10-7). Während bei kleineren Lieferungskubaturen die Einflussfaktoren Gerinneneigung, Einzugsgebietsfläche, Transportprozess, abflussbeeinflussende Negativfaktoren und akkumulierter Energie-Index $E-I_{akk}$ hauptbestimmend sind, werden bei der Lieferung grösserer Volumina zunehmend die Einflussfaktoren Anzahl der Inputstellen und Mündungswinkel wichtig. Dieser Umstand wird bei der Beurteilung berücksichtigt, indem nicht in jeder Feinabschätzung der verschiedenen Lieferungskubatur-Klassen alle Einflussfaktoren beurteilt werden und die Verschiebungsbeträge nach links oder rechts Richtung Vollmobilisierung oder Teilmobilisierung nicht in allen Lieferungskubatur-Klassen gleich stark sind. So wirken beispielsweise abflussbeeinflussende Negativfaktoren bei kleinem Hanginput von $0-1'000 \text{ m}^3$ noch sehr stark vollmobilisierend (Verschiebungsbetrag gegen links 3 Felder), bei einem Hanginput von $10'000-20'000 \text{ m}^3$ ist dieser Effekt nur noch sehr gering (Verschiebungsbetrag gegen links 1 Feld).

0-1'000 m ³	J _{GA}	A _{EG}	TP	NF _a	E-I _{akk}
1'000-2'000 m ³					
2'000-5'000 m ³					
5'000-10'000 m ³					
10'000-20'000 m ³					
>20'000 m ³					

Anz. Inputstellen aus Hang
Mündungswinkel
Hanginput

Abb. 10-7: Qualitative Gewichtung verschiedener Einflussfaktoren auf die Mobilisierung von Geschiebe aus dem Hang im Gerinne in Abhängigkeit von der in einen Gerinneabschnitt gelieferten Kubatur

Am Schluss der Beurteilung kann ganz unten auf der Beurteilungsmatrix der Mobilisierungsfaktor im Gerinne abgelesen werden. Er beträgt 1 bei einer Vollmobilisierung und < 1 bei einer Teilmobilisierung.

Das Verfahren wird nachstehend an einem **Beispiel** erklärt (vgl. auch Abb. 10-8): In einen Gerinneabschnitt mit einer mittleren Gerinneneigung von 28% und einer Einzugsgebietsfläche von 3.8 km² ohne Beeinflussung durch Negativfaktoren, mit einem E-I_{akk} von 39 und einem Einmündungswinkel des Hanginputs von 45° werden laut Geländeabschätzung in einer einzelnen Rutschung 12'500 m³ geliefert, aus denen sich ein Murgang bildet. Bei der Grobabschätzung der Kubatur-Klasse 10'000 bis 20'000 m³ kann anhand der Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung festgestellt werden, dass man sich im hellgrauen Bereich befindet. In diesem Bereich ist unklar, ob die gesamte Kubatur aus dem Hang im Gerinne mobilisiert werden kann und deshalb eine Feinabschätzung nötig. In der Beurteilungsmatrix (vgl. Abb. 10-8) wird somit im hellgrauen Feld in Spalte 5 und Zeile 5A mit der Beurteilung begonnen und die Beurteilungslinie angesetzt:

- In Zeile 5A erfolgt die Frage nach allfälligen abflussbeeinflussenden Negativfaktoren oberhalb oder im Gerinneabschnitt selber. Wären im Beispielsabschnitt abflussbeeinflussende Negativfaktoren vorhanden, würde in der Beurteilung ein Feld nach links gesprungen, also mehr in Richtung Vollmobilisierung. Im obigen Beispiel sind jedoch keine abflussbeeinflussenden Negativfaktoren vorhanden, weshalb die zweite Möglichkeit gewählt wird. Diese Antwort führt dazu, dass mit der Beurteilungslinie weder nach links noch nach rechts gesprungen wird. Der Pfeil nach unten bedeutet, dass zur nächsten Zeile gefahren werden muss und die Beurteilungslinie gerade nach unten geführt wird (vgl. blaue Nr. 1 in Abb. 10-8).
- Es folgt nun die Frage nach dem Transportprozess (Zeile 5B). Kommt von oben bereits ein Murgang oder soll sich ein Murgang aus dem Hanginput bilden? Da sich nach Abb. 8-5 aufgrund der Gerinneneigung und Einzugsgebietsfläche durchaus ein Murgang aus dem Hang bilden kann, wird die Variante Murgang gewählt. Dadurch erfolgt wiederum keine Verschiebung der Beurteilungslinie gegen rechts oder links, die Beurteilungslinie führt gerade nach unten (vgl. blaue Nr. 2 in Abb. 10-8).
- In Zeile 5C folgt die Frage: Gibt es Sperren im Gerinneabschnitt? Falls ja, würde das die Gerinneneigung bei der Einmündung aufgrund des abgetreppten Längenprofils lokal sehr stark vermindern. Im vorliegenden Beispiel gibt es keine Sperren und der Pfeil gegen unten deutet wiederum die nächste Frage an (vgl. blaue Nr. 3 in Abb. 10-8).

- Der $E-I_{akk}$ wird in Zeile 5D abgefragt. Im Beispiel beträgt er 39 und fällt somit in die Klasse 20-50. Dies bedeutet eine Verschiebung der Beurteilungslinie um ein Feld gegen links, da durch einen erhöhten $E-I_{akk}$ die Transportkapazität erhöht ist und dadurch unter Umständen mehr Lockermaterial aus dem Hang mobilisiert werden kann als wenn ein kleiner $E-I_{akk}$ vorherrschen würde (vgl. blaue Nr. 4 in Abb. 10-8).
- In Zeile 5E muss die Anzahl Inputstellen des Hanginputs angegeben werden. Im Beispiel ist es eine Inputstelle, was dazu führt, dass mit der Beurteilungslinie zwei Felder nach rechts gesprungen werden muss, da dadurch die Chance für eine Teilmobilisierung ansteigt (vgl. blaue Nr. 5 in Abb. 10-8).
- Zum Schluss folgt in Zeile 5F der Einmündungswinkel. Die Rutschung im Beispiel mündet in der Klasse 45° in das Gerinne ein. Der/die Anwender/in wird nun darauf aufmerksam gemacht, dass in diesem Fall der Negativfaktor „Verklauung“ möglich ist. Es liegt nun im Ermessensspielraum des Anwenders oder der Anwenderin, zu wählen, ob eine Verklauung geschehen soll oder nicht. Im Beispiel soll eine Verklauung geschehen und diese Durchbrechen, was keine Verschiebung gegen rechts oder links bedeutet. Anschliessend erfolgt ein Sprung zu Zeile 7A, wo der Mobilisierungsfaktor abgelesen werden kann (vgl. blaue Nr. 6 in Abb. 10-8).
- Im Beispiel liegt die Beurteilungslinie nun in Spalte 6 der Beurteilungsmatrix, dies bedeutet einen Mobilisierungsfaktor von 1. Es werden bei den vorgegebenen Bedingungen und beim gewählten Szenario in diesem Gerinneabschnitt also knapp alle $12'500 \text{ m}^3$ Geschiebe aus der Rutschung im Gerinne mobilisiert (vgl. blaue Nr. 7 in Abb. 10-8).

<p>Kubatur aus Hang $10'000-20'000 \text{ m}^3$</p>	<p>Gerinneneigung JGA [%]</p> <p>Einzugsgebietsfläche AEG [km²]</p>	<p>Negativfaktoren:</p> <p>5A - KW, FW, 3HG bis und mit od. VK bis GA: \leftarrow, \downarrow - andere NF oder keine NF bis und mit GA: \downarrow</p> <p>5B Transportprozess im GA: GT: $3^* \rightarrow, \downarrow$ MG \downarrow</p> <p>5C Sperren (VB) im GA: ja: \rightarrow, \downarrow nein: \downarrow</p> <p>5D $E-I_{akk}$ vor Eintritt in GA: 0-5: \downarrow 5-20: \downarrow 20-50: \leftarrow, \downarrow >50: $2^* \leftarrow, \downarrow$</p> <p>5E Anzahl Inputstellen: 1: $2^* \rightarrow, \downarrow$ 2: \rightarrow, \downarrow >2: \downarrow</p> <p>Mündungswinkel der Rutschung/en: - 0°: \downarrow - 45°: VK mögl. VK: $\downarrow 7A$ ohne VK: $\rightarrow, \downarrow 7A$ - 90°: VK wahrsch. VK: $2^* \rightarrow, \downarrow 7A$ ohne VK: $3^* \rightarrow, \downarrow 7A$</p>										1											
		<p>Kubatur aus Hang $>20'000 \text{ m}^3$</p>	<p>Gerinneneigung JGA [%]</p> <p>Einzugsgebietsfläche AEG [km²]</p>	<p>Negativfaktoren:</p> <p>6A - KW, FW, 3HG bis und mit od. VK bis GA: \leftarrow, \downarrow - andere NF oder keine NF bis und mit GA: \downarrow</p> <p>6B Transportprozess im GA: GT: $4^* \rightarrow, \downarrow$ MG \downarrow</p> <p>6C Sperren (VB) im GA: ja: \rightarrow, \downarrow nein: \downarrow</p> <p>6D $E-I_{akk}$ vor Eintritt in GA: 0-5: \downarrow 5-20: \downarrow 20-50: \leftarrow, \downarrow >50: \leftarrow, \downarrow</p> <p>6E Anzahl Inputstellen: 1: $2^* \rightarrow, \downarrow$ 2: \rightarrow, \downarrow >2: \downarrow</p> <p>Mündungswinkel der Rutschung/en: - 0°: \downarrow - 45°: VK mögl. VK: $\rightarrow, \downarrow 7A$ ohne VK: $2^* \rightarrow, \downarrow 7A$ - 90°: VK wahrsch. VK: $2^* \rightarrow, \downarrow 7A$ ohne VK: $4^* \rightarrow, \downarrow 7A$</p>										2									
				<p>7A Mobilisierungs-Faktor im Gerinne</p>										3									
				<p>7A Mobilisierungs-Faktor im Gerinne</p>										4									
				<p>7A Mobilisierungs-Faktor im Gerinne</p>										5									
				<p>7A Mobilisierungs-Faktor im Gerinne</p>										6									
<p>Legende</p> <ul style="list-style-type: none"> Vollmobilisierung VM gehe zu 7A Spalten 1-5 Teilmobilisierung TM oder Vollmobilisierung VM Start Feinabschätzung Spalte 5 Teilmobilisierung TM Start Feinabschätzung Spalte 9 										7	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1			
										Voll- mobilisierung	Teilmobilisierung (Anteil Hanginput)												

Abb. 10-8: Beispiel einer Beurteilung der Mobilisierung von Hanginput im Gerinne

10.8.3 Durchführung im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

In den vorherigen Kap. 10.8.1 und 10.8.2 wurde das Prinzip des Vorgehens gezeigt. Im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren im Excel-File (vgl File „Geschiebeabschätzverfahren_Gertsch.xls“ auf der CD) erfolgen einige Arbeitsschritte automatisiert. Zudem wird die Darstellung mittels der Beurteilungslinie automatisch nachgeführt. Die Beurteilung hierzu erfolgt im Tabellenblatt „Beurteilung Hang und Gerinne“, während die Ergebnisse dieser Beurteilung im Tabellenblatt „Grafik_Hang“ automatisch dargestellt werden (vgl. Abb. 10-9).



Abb. 10-9: Tabellenblatt zu den Hangprozessen

Im Tabellenblatt „Beurteilung Hang und Gerinne“ ist für jeden Gerinneabschnitt eine Beurteilungsspalte reserviert, welche farblich pro Gerinneabschnittsnummer gekennzeichnet ist. Bei jedem Gerinneabschnitt erfolgt zuerst die Beurteilung der seitlichen Hänge. Dabei muss in einem ersten Schritt der erwartete Hanginput in den Gerinneabschnitt im orangen Feld angegeben werden (vgl. Abb. 10-10).

Gerinneabschnitt 2		
Kubatur	Abschätzung Hanginput durch Runsen oder Rutschungen in diesen Gerinneabschnitt in m ³ :	12500
	Vorschlag Modell für maximal möglichen Hanginput [m3]: Murgangbildung aus Hang im Gerinne ist grundsätzlich:	Abschätzung Hanginput aus Feldaufnahmen möglich

Abb. 10-10: Eingabe der Kubatur aus dem Hang im automatisierten Verfahren

Bei der Schreibtisch-basierten Vorgehensweise gibt das Programm als Hilfe automatisch den aufgrund der Verhältnisse H_{pot}/H_{100} und H_F/H_{100} maximal möglichen Geschiebeinput an (vgl. Abb. 10-10). Dafür wird die Grenztabelle für maximalen Geschiebeinput in Abb. 10-5 im Hintergrund mit den Eingabewerten von H_{100} , H_{pot} und H_F aus der Eingabemaske konsultiert und das Ergebnis im grauen Kasten automatisch angezeigt. Bei der Feld-ergänzten Vorgehensweise erscheint hier lediglich der Hinweis, dass die Abschätzung der Kubatur aus dem Hang aus den Geländeanalysen resultiert.

Um später bei einer allfälligen Feinabschätzung zu entscheiden, ob sich aus dem Hangprozess ein Murgang bilden kann, wird zudem automatisch im Hintergrund die in Kap. 8.1.1.1 definierte Formel zum Grenzgefälle für die Bildung von Murgängen ($J_{start} = 26 * A_{EG}^{-0.15}$) mit der aktuellen Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung im Gerinneabschnitt verglichen. Daraus resultiert ein Hinweis, ob die Bildung eines Murgangs aus einem Hangprozess möglich oder unmöglich ist, resp. nur möglich ist mit Hilfe der Bildung einer Verklausung im Gerinne (vgl. Abb. 10-10).

Nachdem die abgeschätzte Kubatur aus dem Hang im orangen Feld eingetragen wurde, erfolgt im Hintergrund automatisch die Grobabschätzung der Mobilisierung im Gerinne. Das Ergebnis wird danach automatisch im obersten Feld des entsprechenden Kubatur-Klassen-Blocks in einem grauen Feld angezeigt (vgl. Abb. 10-11). Liegt der Wert aufgrund der Einzugsgebietsfläche und Gerinneneigung im weissen Bereich der Grobabschätzung, wird „Vollmobilisierung“ angezeigt und der Anwender kann mit der Beurteilung der Gerinneprozesse fortfahren. Liegen die Bedingungen im hellgrauen Bereich, erscheint „Vollmobilisierung oder Teilmobilisierung“ und der/die Anwender/in muss die Feinabschätzung durchführen. Dazu werden die Zeilen, die weitere Eingabewerte erfordern, orange eingefärbt. Angaben zu allfälligen Sperrern im Gerinne

neabschnitt und der $E-I_{akk}$ Wert, werden automatisch ausgerechnet und grau hinterlegt vom System eingefügt. Dasselbe Verfahren ergibt sich bei den Bedingungen im dunkelgrauen Bereich, bei denen als Fazit der Grobabschätzung „Teilmobilisierung“ erscheint.

Kubatur 10000-20000 m ³	Grobabschätzung Mobilisierung im Gerinne bei Hanginput 10000-20000 m ³ Modell sagt:	Teilmobilisierung oder Vollmobilisierung
	Feinabschätzung Mobilisierung im Gerinne bei Hanginput 10000-20000 m ³ Negativfaktoren: - Klüftwasser, Flutwelle oder mehrere Gerinnemündungen bis und mit GA vorhanden: "1" - Verklausungen oberhalb des Gerinneabschnitts vorhanden: "1" - andere oder keine Negativfaktoren bis und mit GA vorhanden: "2"	2
	Transportprozess im Gerinne oder ausgelöst durch diesen Hangprozess (vgl. Zeile 9): Geschiebetrieb: "1" Murgang: "2"	2
	Sperren im GA:	nein
	$E-I_{akk}$ vor Eintritt in GA:	39.0
	Anzahl Inputstellen: - eine Stelle: "1" - zwei Stellen: "2" - >2 Stellen: "3"	1
	Einmündungswinkel der Rutschung/en: - 0°: "1" - 45°: Verklausung möglich: mit Verklausung: "2" ohne Verklausung: "3" - 90°: Verklausung wahrscheinlich: mit Verklausung: "4" ohne Verklausung: "5"	2

Abb. 10-11: Ergebnis der automatischen Grobabschätzung und Eingaben der Feinabschätzung

Zum Schluss werden die wichtigsten Kennwerte aufgelistet und diese können entweder im Tabellenblatt „Beurteilung Hang und Gerinne“ tabellarisch abgelesen (vgl. Abb. 10-12) oder im Tabellenblatt „Grafik_Hang“ grafisch betrachtet und allenfalls ausgedruckt (vgl. Abb. 10-13) werden.

Fazit	Mobilisierung:	Vollmobilisierung
	Mobilisierungsfaktor:	1
	Mobilisierte Kubatur [m ³]:	12500
	NF "Verklausung" VK:	ja

Abb. 10-12: Fazit der Feinabschätzung tabellarisch

Beispiel-Bach

Hanginput 12500 mit Murgangbildung

- GA1
- GA2
- GA3
- GA4
- GA5
- GA6
- GA7
- GA8
- GA9
- GA10
- GA11
- GA12

Grobabschätzung		Feinabschätzung															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Kubatur aus Hang 0-1'000 m³		1A															
Kubatur aus Hang 1'000-2'000 m³		2A															
Kubatur aus Hang 2'000-5'000 m³		3A															
Kubatur aus Hang 5'000-10'000 m³		4A															
Kubatur aus Hang 10'000-20'000 m³		5A															
Kubatur aus Hang >20'000 m³		6A															
Legende □ Vollmobilisierung VM gehe zu 7A Spalten 1-5 ◐ Teilmobilisierung TM oder Vollmobilisierung VM Start Feinabschätzung Spalte 5 ◑ Teilmobilisierung TM Start Feinabschätzung Spalte 9		Mobilisierungs-Faktor im Gerinne															
		7A															
		1 0,9 0,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,3 0,2 0,1															
		Voll- mobilisierung Teil- mobilisierung [Anteil Hanginput]															

Geschiebeabschätzverfahren nach Gertsch (2009)
Hang-Beurteilungsmatrix

3HG = Mündung mehrerer Gerinne; A_{EG} = Einzugsgebietsfläche oberhalb GA [km²]; $E_{I_{akk}}$ = akkumulierter Energie Index;
 FW = Flutwelle; GA = zu beurteilender Gerinneabschnitt; GT = Geschiebetrieb; J_{GA} = mittlere Gerinneneigung im GA [%];
 KW = Klufwasser; MG = Murgang; NF = Negativfaktor; VB = Querverbau im Gerinne; VK = Verkläusung

Eva Gertsch, 13.12.2008

Abb. 10-13: Grafik der Hangbeurteilungsmatrix im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

10.9 Beurteilung der Gerinneprozesse mittels Gerinne-Beurteilungsmatrix

10.9.1 Überblick zum Aufbau der Beurteilungsmatrix

Für die Beurteilung der Geschiebeprozesse im Gerinne und der daraus folgenden Abschätzung der Geschiebebilanz pro Gerinneabschnitt wurde ebenfalls eine Beurteilungsmatrix entwickelt (vgl. Abb. 10-14 oder Anhang C).

Die „Beurteilungsmatrix Gerinne“ ist in 3 Teile gegliedert:

- Der linke Teil ist der **Beurteilung** gewidmet und besteht aus 4 Blöcken mit mehreren Zeilen an Beurteilungskriterien, aus welchen pro Gerinneabschnitt je nach Bedingungen einzelne Zeilen bearbeitet werden müssen.
- Der mittlere Teil beinhaltet **Hilfstabellen**, welche die Entscheidungsfindung bei der Beurteilung im linken Teil vereinfachen und eingrenzen.
- Der rechte Teil besteht aus einer eigentlichen Beurteilungsmatrix mit verschiedenen Zeilen (A bis M) und Spalten (1 bis 35), in denen die **grafische Darstellung der Beurteilung** erfolgt. Es wird mittels einer Beurteilungslinie unter gleichem Vorgehen wie bei der Hang-Beurteilungsmatrix (vgl. Kap. 10.8) die Beurteilung dokumentiert und als Ergebnis erfolgt je nach Lage des Endpunkts der Beurteilungslinie eine Quantifizierung der erwarteten Erosionsleistung, resp. Ablagerungsanteil im Gerinneabschnitt.

Die verschiedenen zu bearbeitenden Beurteilungsblöcke werden in den folgenden Kapiteln detailliert vorgestellt und beinhalten überblicksmässig die folgenden Themen und Aspekte:

- **Lokale Standortfaktoren:** Im ersten Block werden die lokalen Standortfaktoren Einzugsgebietsfläche, Gerinneneigung und Lockermaterialangebot aufgrund der Inputparameter der Eingabemaske (vgl. Kap. 10.7) in die Beurteilung integriert.
- **Beurteilung Transportprozess:** Im zweiten Block wird der Transportprozess im Gerinneabschnitt bestimmt. Dabei werden sowohl die lokalen Standortfaktoren als auch die Bedingungen oberhalb und allfällige Negativfaktoren in der Beurteilung berücksichtigt.
- **Funktion und Quantifizierung des Lieferungspotenzials:** Im dritten Block wird bei gegebenem Transportprozess aufgrund der lokalen Standortfaktoren, Bedingungen oberhalb und Negativfaktoren beurteilt, welche Funktion der Gerinneabschnitt hat (Erosion oder Ablagerung). Danach werden je nach Bedingungen im und oberhalb des Gerinneabschnitts die relevanten Einflussfaktoren berücksichtigt und einzeln hinsichtlich des Lieferungspotenzials beurteilt.
- **Kombination:** Im vierten Block erfolgt die Betrachtung der Einflussfaktor-Kombination. Falls einer der wichtigen Einflussfaktoren so stark limitierend wirkt, dass er alle anderen Einflussfaktoren unterbindet, kann dieser hier identifiziert und die Abschätzung angepasst werden.

Nachdem alle Blöcke bearbeitet sind erfolgt die **Quantifizierung** und die Angabe über die **Funktion des Gerinneabschnitts**. Je weiter rechts sich der Endpunkt der Beurteilungslinie auf der Beurteilungsmatrix nach der gesamten Beurteilung befindet, umso mehr Erosionsleistung findet im Gerinneabschnitt statt. Befindet sich die Beurteilungslinie am Schluss stark links, wird Lockermaterial abgelagert und der Ablagerungsfaktor angegeben.

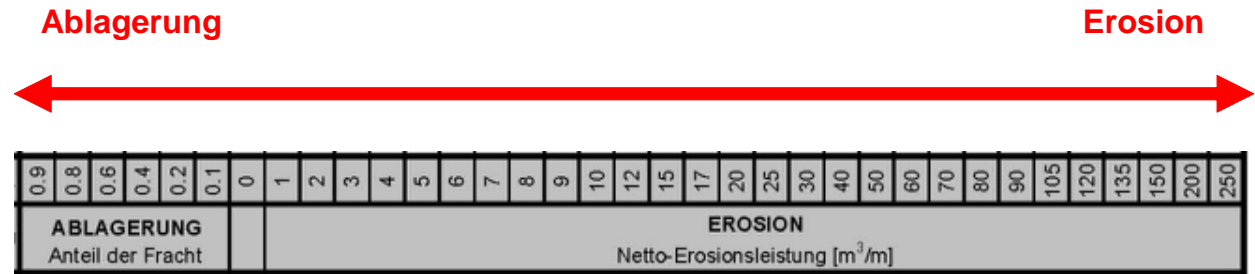


Abb. 10-15: Funktion und Quantifizierung am Ende der Beurteilung

Dieses Vorgehen muss für jeden Gerinneabschnitt einzeln durchgeführt werden. Diese Durchführung wird in der Folge im Detail erklärt. Dabei erfolgt jeweils die Vorstellung der Beurteilungskriterien, theoretische Hintergründe, die für die Entscheidungsfindung nötig sind, die Begründung der Gewichtung der einzelnen Beurteilungskriterien-Möglichkeiten sowie ein Überblick, wie die konkrete Anwendung im automatisierten Verfahren in Excel erfolgt.

10.9.2 Beurteilung der lokalen Standortfaktoren (Zeilen A bis C)

Die Beurteilung der lokalen Standortfaktoren erfolgt auf der Basis der absoluten Werte der Inputparameter Einzugsgebietsfläche A_{EG} [km²] (Zeile A) und Gerinneneigung J_{GA} [%] (Zeile B) sowie der Klassierung des Lockermaterialangebots im Gerinneabschnitt (Zeile C) (vgl. Abb. 10-16). Es wird davon ausgegangen, dass bei steigender Einzugsgebietsfläche (= grösserem Abfluss), grösserer Gerinneneigung (= grössere Geschwindigkeit) und grösserem Lockermaterialangebot (= unlimitiertes Angebot) grundsätzlich mit einer höheren Disposition für Erosion zu rechnen ist. Die Verschiebungsbeträge für die Beurteilungslinie, welche bei jeder Klassierung der drei Standortfaktoren anhand von Pfeilen nach links (eher Ablagerungstendenz) oder rechts (eher Erosionstendenz) dargestellt sind, sind somit umso grösser nach rechts gerichtet, je höhere A_{EG} -, J_{GA} - und LM-Angebots-Werte der Gerinneabschnitt hat. Während beispielsweise bei einer Einzugsgebietsfläche A_{EG} von 0.5-1 km² der Verschiebungsbetrag gegen rechts in Richtung Erosion nur ein Feld beträgt, beträgt er bei einer Einzugsgebietsfläche von > 2 km² 3 Felder.

Standortfaktoren	Einzugsgebietsgrösse A_{EG} [km²]: 0.025-0.5: ↓ 0.5-1: →, ↓ 1-2: 2* →, ↓ >2: 3* →, ↓
	Gerinneneigung J_{GA} [%]: 0-10: ←, ↓ 10-20: ↓ 20-40: →, ↓ >40: 2* →, ↓
	Lockermaterialangebot: Fels (F): ↓ LM limitiert (LML oder VB): →, ↓ LM unlimitiert (LMUL): 2* →, ↓

Abb. 10-16: Zeilen A bis C in der Beurteilungsmatrix

Der Start der Beurteilungslinie in der Beurteilungsmatrix erfolgt in Spalte Nr. 7. Dies ist die „neutrale“ Spalte, bei der die Lage in Bezug auf die Quantifizierung im untersten Block zwischen Ablagerung und Erosion bei einer Erosionsleistung von 0 m³/m liegt (vgl. Abb. 10-14).

Im **automatisierten Abschätzverfahren** werden die 3 Werte für die Einzugsgebietsfläche A_{EG} , die Gerinneneigung J_{GA} und das Lockermaterialangebot automatisch aus der Eingabemaske in das Tabellenblatt „Beurteilung Hang und Gerinne“ in den nun beginnenden Gerinnebeurteilungsteil eingetragen. Die graue Farbe des Kastens zeigt an, dass diese Werte vom System eingetragen wurden und keine eigenen Eingabewerte gemacht werden müssen (in diesem Fall wären die Zellen leer und orange eingefärbt). Die Beurteilung wird analog zu den Hangprozessen ebenfalls automatisch im Tabellenblatt „Grafik_Gerinne“ dargestellt (vgl. Abb. 10-17 bis Abb. 10-19).



Abb. 10-17: Tabellenblatt zu den Gerinneprozessen

Gerinneabschnitt 1		
Lokale Standortfaktoren	Einzugsgebietsfläche A_{EG} [km ²]:	0.015
	Gerinneneigung J_{GA} [%]:	146.4
	Lockermaterialangebot: - LM unlimitiert (LMUL): "1" - LM limitiert (VB) Sperren: "2" - LM limitiert (LML) natürlich: "3" - Fels (F): "4"	3

Abb. 10-18: Automatischer Eintrag der 3 lokalen Standortfaktoren im automatisierten Verfahren

Beurteilung		Hilfstabellen												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Standortfaktoren	Einzugsgebietsgröße A_{EG} [km ²]:	A												
	Gerinneneigung J_{GA} [%]:	B												
	Lockermaterialangebot:	C												
Fels (F): ↓ LM limitiert (LML oder VB): →, ↓ LM unlimitiert (LMUL): 2* →, ↓														

Abb. 10-19: Automatische Darstellung in der „Grafik_Gerinne“

10.9.3 Beurteilung Transportprozess, Funktion und Lieferungspotenzial (Zeilen D bis J)

Im zweiten und dritten Block (vgl. Abb. 10-14) wird nun der Transportprozess im Gerinneabschnitt, die Funktion während dem Grossereignis und das Lieferungspotenzial aufgrund der verschiedenen, relevanten Einflussfaktoren unter Berücksichtigung aller Blickwinkel (lokale Standortfaktoren, Bedingungen oberhalb und Negativfaktoren) bestimmt.

Es sind nicht immer sämtliche Einflussfaktoren relevant. Zudem können die relevanten Einflussfaktoren je nach Situation eine unterschiedliche Wichtigkeit besitzen. Deshalb wurde ein Beurteilungskatalog (Zeilen D bis J) zusammengestellt, aus dem je nach Bedingungen im Gerinneabschnitt die relevanten Kriterien beantwortet werden müssen. Je nach Bedingungen im Gerinneabschnitt und je nach Szenario wird der/die Anwender/in durch die für den Gerinneabschnitt relevanten Beurteilungskriterien geführt. Basis dieser Auswahl an relevanten Beurteilungskriterien ist ein Entscheidungsbaum in Abb. 10-20:

Die erste Frage im Entscheidungsbaum (Abb. 10-20), die Frage nach einem „Murgang von oben“ (Zeile D in Abb. 10-14) muss in jedem Fall beantwortet werden. Falls diese Frage mit „nein“ beantwortet wird, stellt sich die Frage (Zeile F), ob sich im aktuellen Gerinneabschnitt allenfalls ein neuer Murgang bilden kann oder nicht. Wenn ja, wird der Gerinneabschnitt beur-

teilt nach den erosionsfördernden Faktoren in der Auslösungsstrecke des Murgangs (Zeile I). Wenn nein, nach den erosionsfördernden oder erosionshemmenden Einflussfaktoren bei Geschiebetrieb (Zeile H).

Wenn die erste Frage (Zeile D) mit ja beantwortet werden kann, erfolgt die Anschlussfrage, ob der Murgang von oben im betreffenden Gerinneabschnitt überhaupt weitertransportiert werden kann und weitertransportiert werden soll (Zeile E). Falls ja, erfolgt die Beurteilung der erosionsfördernden und erosionshemmenden Faktoren bei Murgangtransport in Zeile J. Falls nein, erfolgt ein Murgangstop im Gerinne. Wenn ein „von oben kommender Murgang“ im Gerinneabschnitt stoppt, heisst dies zwar, dass im Gerinne selber normalerweise kein neuer Murgang ausgelöst werden kann, jedoch ist unter gewissen Umständen eine Neubildung durch eine Verklausung möglich (vgl. Kap. 8.1.1.1). Dies wird in Zeile G abgeklärt. Falls keine Neubildung eines Murgangs erfolgen kann, was in den meisten Fällen so sein wird, erfolgt die Beurteilung der erosionsfördernden und erosionshemmenden Einflussfaktoren bei Geschiebetrieb (Zeile H). Im anderen Fall erfolgt die Beurteilung bei Auslösestrecken von Murgängen (Zeile I).

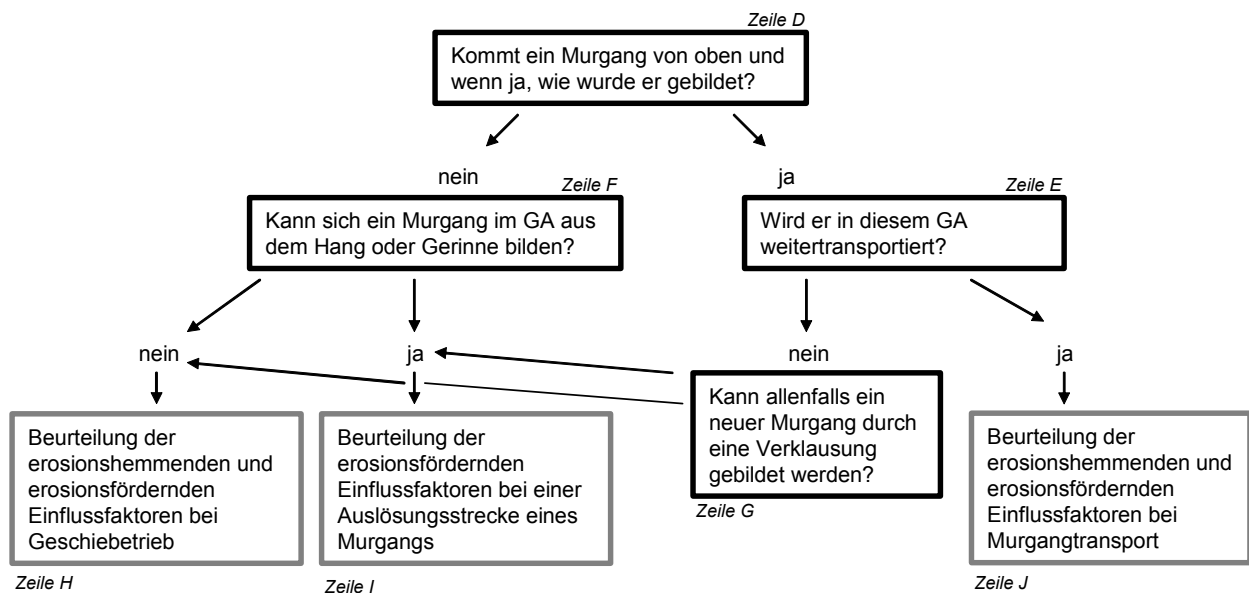


Abb. 10-20: Entscheidungsbaum als Basis zur Auswahl der relevanten Beurteilungskriterien (schwarz: Beurteilungskriterien des Blocks „Transportprozess“, grau: Beurteilungskriterien des Blocks „Funktion und Quantifizierung Lieferungspotenzial“)

In den folgenden Gerinneabschnitten sind die relevanten Fragen und dadurch zu bearbeitenden Beurteilungskriterien/Zeilen in der Beurteilungsmatrix somit:

- Erstabschnitte (ohne Bildung eines Murgangs): Zeilen D – F – H
- Erstabschnitte (mit Bildung eines Murgangs): Zeilen D – F – I
- Unterlieger-Abschnitte (ohne Murgang von oben und ohne Neubildung eines Murgangs im Gerinneabschnitt): Zeilen D – F – H
- Unterlieger-Abschnitte (ohne Murgang von oben, aber mit Neubildung eines Murgangs im Gerinneabschnitt): Zeilen D – F – I
- Unterlieger-Abschnitte (mit Murgang von oben und Weitertransport): Zeilen D – E – J
- Unterlieger-Abschnitte (mit Murgang von oben, Murgangstop und weiter als Geschiebetrieb): Zeilen D – E – G – H
- Unterlieger-Abschnitte (mit Murgang von oben, Murgangstop, aber Neubildung durch Verklausung): Zeilen D – E – G – I

Der/die Anwender/in muss die relevanten Beurteilungskriterien jedoch nicht selber durch die Anwendung des Entscheidungsbaums in Abb. 10-20 heraussuchen, sondern wird in der Gerinne-Beurteilungsmatrix (Abb. 10-14) direkt durch seine Antworten pro Beurteilungskriterium durch die vertikalen Pfeile zur nächsten relevanten Frage geführt.

In der Folge wird nun das einzelne Vorgehen in den einzelnen Beurteilungszeilen des gesamten Katalogs der Reihe nach vorgestellt:

Zeile D – Murgangprozess von oben?

Die Frage in Zeile D ist, ob aus einem oberen Gerinneabschnitt ein Murgang kommt (vgl. Abb. 10-21). In Erstabschnitten sowie in Unterlieger-Abschnitten, oberhalb denen Geschiebetrieb herrscht, wird diese Frage mit „nein“ beantwortet. In Unterlieger-Abschnitten, in denen oberhalb bereits ein Murgang gebildet wurde, ergibt sich ein „ja“ als Antwort. Anschliessend wird der Entstehungsmechanismus dieser Murgänge von oberhalb abgefragt.

Murgangprozess von oben?	
nein: 2*↓	ja, durch: -Sohlenverflüssigung, od. aus Hangmure: ↓
	- NF FW, KW, 3HG, VK: 4*→,↓
	- NF BM, PF, AS od. GR:
	mit 2*→,↓ / ohne 5*→,↓ Zwischenablagerung

Abb. 10-21: Zeile D der Gerinne-Beurteilungsmatrix

Es stehen 3 Möglichkeiten zur Beantwortung dieser Frage zur Auswahl. Bei der ersten Möglichkeit sind die klassischen Entstehungsmechanismen Sohlenverflüssigung oder Fortsetzung aus einer Hangmure die Auslöser. In der zweiten Möglichkeit sind es die abflussbeeinflussenden Negativfaktoren Flutwelle (FW), Kluftwasser (KW), mehrere Mündungen (3HG) oder Verklauung (VK). In der dritten Möglichkeit die geschiebebeeinflussenden Negativfaktoren Bastionsmoräne (BM), Permafrost (PF), Ausräumung auf Stauhorizont (AS) und Grossrutschung (GR). Bei diesen geschiebebeeinflussenden Negativfaktoren wird zudem die Unterscheidung gemacht, ob es zwischen der Auslösestelle und dem aktuellen Gerinneabschnitt zu Zwischenablagerungen gekommen ist.

Aufgrund der Datenanalysen (vgl. Kap. 8.1.1.2) wird davon ausgegangen, dass klassische Murgänge durch Sohlenverflüssigung oder aus Fortsetzungen aus dem Hang im Vergleich zu durch Negativfaktoren ausgelösten Murgängen eine kleinere erosive Wirkung haben, weshalb keine horizontale Verschiebung in der Beurteilungsmatrix erfolgt. Bei den Murgängen, die durch Negativfaktoren ausgelöst wurden erfolgt hingegen eine Verschiebung gegen rechts Richtung stärkere Erosionsleistung. Die verschiedenen Negativfaktoren werden differenziert betrachtet. Grundsätzlich wird erwartet, dass geschiebebeeinflussende Negativfaktoren durch ihre Masse im Fall ohne Zwischenablagerungen die grösste erosive Wirkung erzielen, weshalb der Verschiebungsbetrag gegen rechts 5 Felder beträgt. Wie anhand des Minstigerbachs in Kap. 8.1.1.2 beobachtet wurde, gehen bei Zwischenablagerungen Teile dieser Wirkung verloren, weshalb im Fall von Zwischenablagerungen die Beurteilungslinie nur um 2 Felder nach rechts verschoben wird. Zwischenablagerungen spielen bei abflussbeeinflussenden Negativfaktoren eine untergeordnete Rolle, aus diesem Grund wird bei Möglichkeit 2 diese Unterscheidung nicht gemacht und der Verschiebungsbetrag nach rechts mit 4 Feldern definiert.

Im Fall einer Negativfaktor-Kombination, z.B. Grossrutschung und Verkläusung GRVK, erfolgt eine Verschiebung anhand des im Wildbachsystem räumlich gesehen untersten Negativfaktors. Im Beispiel GRVK erfolgt oben die Grossrutschung und unten dann die Verkläusung. In diesem Fall würde somit der Negativfaktor Verkläusung VK in der Beurteilung berücksichtigt und mit 4 Verschiebungsbeträgen nach rechts gewichtet.

Im **automatisierten Abschätzverfahren** (siehe CD) ist die Frage in Zeile D von Beginn weg orange eingefärbt, was bedeutet, dass hier ein Eintrag erwartet wird. Durch die Angabe der Codes 1 bis 5 erfolgt die Beurteilung gemäss Abb. 10-22. Danach wird automatisch die nächste Frage, welche beantwortet werden muss, orange eingefärbt.

Murgangprozess von oben? - nein: "1" - ja, durch: - Sohlenverflüssigung, oder Hangmure: "2" - ja, durch: - NF: Flutwelle, Kluftwasser, mehrere Mündungen, Verkläusung: "3" - ja, durch: - NF: Bastionsmoräne, Permafrost, Ausräumung auf Stauhorizont, Grossrutschung mit Zwischenablagerung: "4" ohne Zwischenablagerung: "5"	
---	--

Abb. 10-22: Zeile D im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

Zeile E – Weitertransport als Murgang?

Falls das Beurteilungskriterium in Zeile D mit „ja“ beurteilt wird, erfolgt in Zeile E die Abklärung, ob dieser Murgang von oben im aktuellen Gerinneabschnitt weitertransportiert werden kann. Als Antwort stehen die Möglichkeiten „ja“ oder „nein“ zur Auswahl.

Weitertransport als Murgang? (Vgl. E1 und E2) ja: 6*→,5*↓ nein: 2*↓
--

Abb. 10-23: Zeile E der Gerinne-Beurteilungsmatrix

Als Entscheidungsgrundlage, ob aufgrund der Bedingungen im Gerinneabschnitt ein Weitertransport überhaupt möglich ist, wurden zwei Hilfstabellen entwickelt (vgl. Abb. 10-24). Die erste Hilfstabelle E1 bildet eine Grobabschätzung aufgrund der beiden Kriterien Gerinneneigung J_{GA} und dem Verhältnis zur Gerinneneigung im oberen Gerinneabschnitt J_{GA}/J_{GAob} . Dabei wird davon ausgegangen, dass je steiler die Gerinneneigungen J_{GA} ist und je grösser der Wert J_{GA}/J_{GAob} ist (= geringe Verflachung), desto eher ein Murgang weitertransportiert wird. Bei Gerinneneigungen unter 10% wird von einem Murgangstop ausgegangen. Im kritischen Bereich der Gerinneneigung J_{GA} und der Verflachung J_{GA}/J_{GAob} erfolgt eine Detailabklärung und es wird auf die Hilfstabelle E2 verwiesen (vgl. Abb. 10-24 rechts E2), bei der weitere Einflussfaktoren für einen Entscheid beigezogen werden:

- **Akkumulierter Energie-Index $E-I_{akk}$:** Bei einem Wert über 50, also einer sehr grossen Geschwindigkeit, kann der Murgang fortgesetzt werden, bei Werten zwischen 5 und 50 je nach den folgenden Einflussfaktoren:
 - Vorhandensein von Negativfaktoren (können zu speziell intensiven Murgängen führen) oder

- Einmündung eines bedeutenden Seitengerinnes (zusätzlicher Abflussinput führt eher zu einer Weiterverlagerung)
- Lage des Gerinneabschnitts unterhalb eines sehr steilen, wasserfallartigen Gerinneabschnitts. Bei genügend steilen Bedingungen werden Murgänge unterhalb von Wasserfällen zwar kurzzeitig gestoppt, oftmals können sich diese Schuttkörper danach aber sehr schnell wieder mit Wasser sättigen und wiederum als Murgang mobilisiert werden, so z.B. beobachtet im Alpenbach (18). Im Geschiebeabschätzverfahren wird dieser zeitlich versetzte Prozess als Weitertransport definiert, da Aussagen zum gesamten Ereignisablauf und nicht zu zeitlich differenzierten Prozessen gemacht werden.

		J_{GA}/J_{GAob}						
E1		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	>0.75	Negativfaktoren bis+mit GA od. $GA_{ob} = F/LML$ mit $J_{GA} > 60\%$ od. Mündung bedeutendes SG		
		ja	ja	ja	ja	E2	ja / nein	
J_{GA} [%]	0-10	nein	nein	nein	nein	$E-l_{akk}$	5-20	ja / nein
	10-20	E2*	E2*	ja	ja		20-50	ja / **ja/*nein
	20-40	E2**	ja	ja	ja		>50	ja / ja
	>40	ja	ja	ja	ja			

Abb. 10-24: Hilfstabellen E1 und E2 zur Beurteilung des Weitertransports von Murgängen

Mit Hilfe dieser Abklärungen kann beurteilt werden, ob ein Murgang von oben weitertransportiert werden kann oder nicht. Falls er weitertransportiert werden kann, liegt es jedoch immer noch im Ermessensspielraum des/der Experten/in, den Murgang trotzdem stoppen „zu lassen“ und als Antwort im Beurteilungskriterium „nein“ zu setzen. Die Wahl „nein“ hat zur Folge, dass zu Zeile G gesprungen wird. Die Wahl „ja“ führt dazu, dass um 6 Felder nach rechts gesprungen wird, da Murgänge grundsätzlich ein grösseres Erosionspotenzial haben.

Im **automatisierten Abschätzverfahren** wird die Hilfstabelle E1 im Hintergrund automatisch laufen gelassen und den Anwendern in einer grauen Zelle mitgeteilt, ob ein Weitertransport möglich ist oder nicht, oder nur unter den Bedingungen in Hilfstabelle E2. Der $E-l_{akk}$ wird als Hilfswert für die Entscheidung automatisch angezeigt. Der/die Anwender/in kann danach selber entscheiden, ob bei einem möglichen Weitertransport der Murgang trotzdem gestoppt werden soll.

Weitertransport als Murgang? -ja: "1" -nein: "2"	1
Modell sagt, Weitertransport ist:	möglich
Eingabehilfe: E-lakk:	12.2

Abb. 10-25: Zeile E im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

Zeile F – Murgangbildung in Gerinne oder Hang?

Wird in Zeile D die Frage „Kommt ein Murgang von oben?“ mit „nein“ beantwortet, erfolgt in Zeile F die Beurteilung, ob sich ein neuer Murgang bildet und wenn ja, durch welchen Entste-

hungsmechanismus. Zur Auswahl stehen einerseits die Möglichkeit „nein“, also es bildet sich kein Murgang im Gerinneabschnitt, andererseits „ja“, wobei nun die verschiedensten Entstehungsmechanismen gewählt werden können. Unterteilt werden die Murgangauslösungen im Gerinne: Sohlenverflüssigung oder die verschiedenen Negativfaktoren Flutwelle (FW), Kluftwasser (KW), mehrere Mündungen (3HG), Verklausung (VK), Bastionsmoräne (BM), Permafrost (PF) oder Ausräumung auf Stauhohizont (AS). Aber auch aus dem Hang kann sich ein Murgang bilden, hier werden die verschiedenen Entstehungsmechanismen unterteilt nach der Mobilisierung im Gerinne: Vollmobilisiert (VM), Teilmobilisiert ohne Verklausung (TM ohne VK) und Teilmobilisiert mit Verklausung (TM mit VK). Der Negativfaktor Grossrutschung GR ist in diesen Hang-Entstehungsmechanismen integriert.

Murgangbildung in Gerinne oder Hang?	
nein	2*↓
ja in Gerinne durch:	- Sohlenverflüssigung oder NF PF geringmächtig 6*→,3*↓ - NF: FW, KW, 3HG od. VK: 11*→ (opt) 16*→ (pess),3*↓ - NF: BM, PF, AS: 16*→ (opt) 21*→ (pess),3*↓
ja aus Hang (Vgl. Beurteilungsmatrix Hang):	VM: 6*→,3*↓ TM ohne VK: 3*→,3*↓ TM mit VK: 8*→ (opt) 12*→ (pess),3*↓

Abb. 10-26: Zeile F der Gerinne-Beurteilungsmatrix

Damit eine Murgangauslösung im Gerinneabschnitt erfolgen kann, müssen minimale Bedingungen erfüllt sein. So muss einerseits überhaupt mobilisierbares Lockermaterial vorhanden sein und zusätzlich muss das Zusammenspiel von minimaler Gerinneneigung und Einzugsgebietsfläche oberhalb (vgl. Kap. 8.1.1.1) über der in Abb. 8-5 definierten und dargestellten Grenzlinie der Gerinneneigung liegen. Als Hilfestellung für den Entscheid, ob grundsätzlich die Bildung eines Murgangs überhaupt möglich ist, wurden auf der Basis der Erkenntnisse in Kap. 8.1.1.1 die folgenden Regeln definiert:

Die Auslösung eines Murgangs im Gerinne oder die Fortsetzung eines Murgangs aus dem Hang in einem Gerinneabschnitt ist:

- möglich bei: $J_{GA} > 26 * A_{EG}^{-0.15}$
- nur möglich durch eine Verklausung im Gerinne bei:
 $J_{GA} < 26 * A_{EG}^{-0.15}$ UND $A_{EG} > 1 \text{ km}^2$ UND $J_{GA} > 15 \%$
- nicht möglich bei:
 $J_{GA} < 26 * A_{EG}^{-0.15}$ UND ($A_{EG} < 1 \text{ km}^2$ ODER $J_{GA} < 15 \%$)

Mit dieser Grundlage kann geklärt werden, ob die Auslösung eines Murgangs grundsätzlich überhaupt möglich ist. Wenn ja, kann der/die Anwender/in nun im eigenen Ermessensspielraum entscheiden, ob auch wirklich ein Murgang entstehen „soll“ und welcher Entstehungsmechanismus in welchem Ausmass gewählt wird.

Von der Gewichtung her werden die klassischen Murgangauslösungen Sohlenverflüssigung und Fortsetzung aus einer Hangmure mit 6 Verschiebungsbeträgen nach rechts in der Beurteilungsmatrix gewichtet, ebenso der Negativfaktor Permafrost mit einer geringmächtigen Auftauschicht. Bei der Murgangauslösung durch Negativfaktoren kann die/der Anwender/in im eigenen Ermessensspielraum wählen zwischen einer optimistischen und einer pessimistischen Variante. Die abflussbeeinflussenden Negativfaktoren werden im optimistischen Fall mit 11, im pessimistischen Fall mit 16 Verschiebungsbeträgen nach rechts gewichtet, die geschiebebeeinflussenden Negativfaktoren mit 16 im optimistischen Fall, 21 im pessimistischen Fall. Der Grund für diese stärkere Gewichtung liegt darin, dass bei den Auswertungen der Negativfaktoren in Kap.

8.1.1.2 bei direkter Beeinflussung von geschiebebeeinflussenden Negativfaktoren in einem Gerinneabschnitt deutlich höhere Erosionsleistungen beobachtet wurden als bei den abflussbeeinflussenden Negativfaktoren.

Bei den Murgangauslösungen aus dem Hang wurde die „Teilmobilisierung ohne Verklauung“ mit nur 3 Feldern Verschiebung nach rechts relativ gering gewichtet. Der Grund liegt darin, dass in diesen Fällen die Transportkapazität durch eine stetige Aufnahme an quasi unendlich verfügbarem mobilisierbaren Lockermaterial praktisch immer ausgelastet ist und deshalb keine Kapazität für grössere Erosionsleistungen im Gerinne vorhanden ist. Anders ist dieser Umstand bei „Teilmobilisierung mit Verklauung“. Diese Möglichkeit repräsentiert unter anderem auch die Negativfaktor-Kombination „Grossrutschung mit Verklauung“. Hier wird von einem plötzlichen Durchbruch ausgegangen und diese Möglichkeit deshalb mit 8 (optimistisch), resp. 12 (pessimistisch) Verschiebungsbeträgen ähnlich gewichtet wie die abflussbeeinflussenden Negativfaktoren.

Es versteht sich von selbst, dass die Möglichkeiten der Auslösungen durch Hangprozesse im Einklang mit der Beurteilung der Hangprozesse (Kap. 10.8) im selben Gerinneabschnitt erfolgen müssen. Ebenso dürfen nur Negativfaktoren als Entstehungsmechanismen gewählt werden, die in der Realität auch wirklich möglich sind. Es liegt am Gutachter, diese potenziellen Schwellenprozesse zu erkennen und in der Szenarienwahl einzubeziehen. Grundlagen zu den verschiedenen Negativfaktoren und den Voraussetzung zu deren Auslösung sind in Kap. 6.3 zu finden.

Im **automatisierten Geschiebeabschätzverfahren** wird die Frage, ob überhaupt eine Auslösung eines Murgangs erfolgen kann oder nicht, oder nur durch eine Verklauung, automatisch im Hintergrund unter der Anwendung der oben beschriebenen Regeln beantwortet. Sie wird danach im grauen Feld der/dem Benutzer präsentiert. Danach kann er/sie aus den Möglichkeiten der Entstehungsmechanismen wählen und den entsprechenden Code im orangen Feld eintragen (vgl. Abb. 10-27).

Murgangbildung im Gerinne oder aus dem Hang? - nein, weder im Gerinne noch aus dem Hang: "1" - ja im Gerinne durch: - Sohlenverflüssigung: "2" - NF Permafrost geringe Mächtigkeit: "3" - NF Flutwelle, Kluftwasser, mehrere Mündungen, Verklauung: optimistisch: "4" pessimistisch: "5" - NF Bastionsmoräne, Permafrost, Ausräumung auf Stauhizont: optimistisch: "6" pessimistisch: "7" - ja aus dem Hang (vgl. Beurteilung Hang): - Vollmobilisiert: "8" - Teilmobilisiert ohne Verklauung: "9" - Teilmobilisiert mit Verklauung: optimistisch: "10" pessimistisch: "11"	1
Modell sagt, Murgangbildung:	nicht möglich

Abb. 10-27: Zeile F im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

Zeile G – Murgangneubildung durch Verklauung?

Murgangneubildung durch VK? (Vgl. Beurteilungsmatrix Hang und Auslösungbedingung F1) nein: ↓ ja: 8*→ (opt) 12*→ (pess),2*↓

Abb. 10-28: Zeile G in der Gerinne-Beurteilungsmatrix

Wurde die Frage in Zeile E „Weitertransport als Murgang?“ mit „nein“ beantwortet, erfolgt ein Murgangstop und die Frage in dieser Zeile G muss als nächste beantwortet werden. Wenn ein Murgang gestoppt wird, ist das Gefälle so flach, dass sich durch Sohlenverflüssigung oder durch die meisten Negativfaktoren im Gerinne kein neuer Murgang bilden kann. Allerdings wurde in Kap. 8.1.1.1 die Beobachtung gemacht, dass sich unter gewissen Umständen, nämlich wenn sich eine Verklausung im Gerinne bildet und durchbricht, auch bei flacheren Bedingungen Murgänge bilden können. Das heisst, falls die Bedingungen für einen Weitertransport als Murgang nur knapp verfehlt werden, kann es immer noch sein, dass sich ein neuer Murgang durch eine Verklausung bilden kann.

Für die Beurteilung in der vorhergehenden Zeile F wurden die Bedingungen für „Murgangbildung durch Verklausung“ definiert als:

- nur möglich durch eine Verklausung im Gerinne bei:
 $J_{GA} < 26 * A_{EG}^{-0.15}$ UND $A_{EG} > 1 \text{ km}^2$ UND $J_{GA} > 15 \%$

Falls diese Bedingungen vorherrschen, kann somit im Szenario wieder ein Murgang entstehen. Dabei kann die Verklausung sowohl durch Schwemmholz, Schnee, Eis oder aus dem Hang durch eine Rutschung erfolgen. Als Antwort-Möglichkeiten hat der/die Anwender/in deshalb die Möglichkeit „nein“ oder „ja“. Bei „ja“ kann eine optimistische und eine pessimistische Variante gewählt werden. Bei der pessimistischen Variante wird mit einem grösseren Rückstau hinter der Verklausung gerechnet als bei der optimistischen Variante, was zu grösseren Erosionsleistungen führen kann.

Im **automatisierten Geschiebeabschätzverfahren** erfolgt die Prüfung der Bedingungen nach obiger Formel automatisch im Hintergrund und es wird in einem grauen Feld angezeigt, ob es möglich ist, dass durch eine Verklausung wiederum eine Murgangauslösung erfolgt. Der/die Benutzer/in kann danach den Code für die Antwort einfügen (vgl. Abb. 10-29)

Neue Murgangbildung durch VK? <i>(Vgl. auch Beurteilung Hang)</i> - nein: "1" - ja: optimistisch: "2" pessimistisch "3"	
Modell sagt, Murgangbildung durch VK ist:	möglich

Abb. 10-29: Zeile G im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

Zeile H – Erosionsfördernde und erosionshemmende Einflussfaktoren bei Geschiebetrieb

Nachdem die Beurteilung ergeben hat, dass im Gerinneabschnitt entweder kein Murgang gebildet werden kann oder ein Murgang von oben gestoppt wird und sich kein neuer durch eine Verklausung bilden kann, ist klar, dass im Gerinneabschnitt der Transportprozess „Geschiebetrieb“ vorherrscht. Die nächste Frage soll nun klären, wie viel Geschiebe in diesem Gerinneabschnitt durch Geschiebetrieb mobilisiert werden kann. Die Palette reicht hier rein qualitativ gesehen von starker Ablagerung bis zu starker Erosion. In einem ersten Schritt muss deshalb die grobe Tendenz beurteilt werden, ob es sich eher um Ablagerung oder Erosion handelt. Je nach Ergebnis dieser Tendenz werden anschliessend die relevanten Einflussfaktoren beurteilt.

Das Vorgehen richtet sich nach folgender Hilfstabelle in Abb. 10-30:

		J_{GA}/J_{GAob}			
<i>H1</i>		0-0.25	0.25-0.5	0.5-0.75	>0.75
J _{GA} [%]	0-10	S2	S3	S4	S5
	10-20	S4	S5		
	20-40	S7			
	>40				

S2 bedeutet: gehe zu Spalte 2

Abb. 10-30: Hilfstabelle zu Zeile H

Durch einen Vergleich der Gerinneneigung J_{GA} mit dem Verhältnis zur Gerinneneigung im oberen Gerinneabschnitt J_{GA}/J_{GAob} wird in einem ersten Schritt die Tendenz der Funktion des Gerinneabschnitts beurteilt. Je flacher der Gerinneabschnitt und je stärker die Verflachung ist, umso mehr muss mit Ablagerungstendenz gerechnet werden. Ist beispielsweise ein Gerinneabschnitt 7% geneigt und hat ein Verhältnis J_{GA}/J_{GAob} von 0.45, befindet er sich im dunkelgrauen Feld mit der Aufschrift S3 in der Hilfstabelle. Dieses Feld beinhaltet nun verschiedene Informationen zur weiteren Beurteilung (vgl. Abb. 10-30):

- Der **Text im Feld** gibt die Spalte in der Beurteilungsmatrix an, auf welche die Beurteilungslinie aufgrund der Neigungsverhältnisse verschoben werden muss. S3 im Beispiel bedeutet, dass die Beurteilungslinie in der Beurteilungsmatrix unabhängig davon, in welcher Spalte sie sich momentan befindet, nun fix auf die Spalte Nr. 3 verschoben werden muss. Bei näherer Betrachtung der Hilfstabelle wird ersichtlich, dass die Verschiebung umso stärker nach links erfolgt in Richtung Ablagerung, je flacher ein Gerinneabschnitt ist und je stärker eine Verflachung ist. Falls kein Text im betreffenden Feld ist, herrschen keine Ablagerungsfördernde Einflussfaktoren und es ist mit Erosion zu rechnen. In diesem Fall erfolgt keine Verschiebung gegen links und die Beurteilungslinie bleibt dort, wo sie aktuell liegt.
- Mit dem eventuell neuen Ausgangsfeld in der Beurteilungsmatrix aufgrund des Textes in der Hilfstabelle (Abb. 10-30) erfolgt nun die weitere Beurteilung. Diese wird bestimmt durch die **Farbe des Feldes**: Sie gibt an, welche Fragen, resp. relevanten Einflussfaktoren nun beurteilt werden müssen (vgl. Abb. 10-31). Zur Auswahl stehen Fragen in dunkelgrauen, hellgrauen oder weissen Feldern.
 - **Dunkelgrau**: Im dunkelgrauen Bereich befinden sich Gerinneabschnitte, die eine starke Ablagerungstendenz zeigen. In Kap. 8.2.2 zeigte sich, dass in diesem Fall weder Negativfaktoren noch sonstige erosionsfördernde Einflussfaktoren fähig sind, eine Ablagerung zu verhindern. Dafür können grössere Hanglieferungen in oberen Gerinneabschnitten und im Gerinneabschnitt selber sowie geschiebebeeinflussende Negativfaktoren von oben die Ablagerungstendenz noch verstärken. Aus diesem Grund sind diese beiden Einflussfaktoren zu beurteilen. Falls diese Merkmale im Gerinneabschnitt oder oberhalb auftreten, führt das dazu, dass eine Ablagerungstendenz, welche aufgrund der Neigungsverhältnisse vorliegt, noch verstärkt wird und es erfolgt eine Verschiebung gegen links, also in Richtung eines hohen Ablagerungsfaktors. Dabei werden die Beträge der verschiedenen Verschiebungspfeile addiert, falls z.B. beide Einflussfaktoren vorhanden sind. Falls keiner dieser ablagerungsfördernder Einflussfaktoren vorhanden ist, erfolgt auch keine Verschiebung.

- **Hellgrau:** Im hellgrauen Bereich kann davon ausgegangen werden, dass sich ein Gerinneabschnitt im Grenzbereich zwischen Ablagerung und Erosion befindet. Die Beurteilung von solchen Umlagerungsstrecken ist schwierig. Bei den Auswertungen in Kap. 8.2.2 hat sich gezeigt, dass das Potenzial für eine Ablagerung in diesem Bereich grundsätzlich vorhanden ist und durch erosionsfördernde oder erosionshemmende Einflussfaktoren gesteuert wird. Aus diesem Grund werden im hellgrauen Bereich sowohl die erosionshemmenden/ablagerungsfördernden Einflussfaktoren (Hanginput oberhalb und im Gerinneabschnitt selber und geschiebebeeinflussende Negativfaktoren, indirekte Beeinflussung) als auch die erosionsfördernden Einflussfaktoren (abflussbeeinflussende Negativfaktoren oberhalb, Einmündungen von bedeutenden Seitengerinnen und akkumulierter Energie-Index $E-I_{akk}$) beurteilt. Erosionshemmende Einflussfaktoren ziehen die Beurteilungslinie gegen links Richtung Ablagerung, während die erosionsfördernden Einflussfaktoren gegen rechts Richtung Erosion ziehen. Auch hier werden bei Vorhandensein der Beurteilungskriterien die Verschiebungsbeträge aufsummiert. Wenn also im Gerinneabschnitt sowohl ein Hanginput von 5'500 m³ bis und mit dem Gerinneabschnitt erfolgte (1 Pfeil nach links) als auch ein $E-I_{akk}$ von 34 herrscht (2 Pfeile nach rechts), ist die Verschiebung insgesamt in Zeile H 1 Pfeil nach rechts.
- **Weiss:** Im weissen Bereich in der Hilfstabelle in Abb. 10-30 kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der Neigungsverhältnisse nicht mit Ablagerungen gerechnet werden muss. Aus diesem Grund liegt die ganze Konzentration auf den erosionsfördernden Einflussfaktoren (abflussbeeinflussende Negativfaktoren oberhalb, Einmündungen von bedeutenden Seitengerinnen und hohe Werte des akkumulierten Energie-Index $E-I_{akk}$). Sie alle führen zu einer Verschiebung nach rechts in Richtung Erosion. Je stärker sie ausgeprägt sind und je mehr dieser Faktoren aktiv sind, umso stärker ist die Verschiebung.

Erosion/Ablagerung bei Geschiebetrieb	
<i>(Mehrfachantworten, Pfeile horizontal addieren, dann 3*↓)</i>	
- Ablagerungstendenz (Vgl. H1: Spaltenangabe und Feldfarbe)	
- dunkel-/hellgrau:	- Hanginput bis+mit GA: 5'000-20'000 m ³ : ← >20'000 m ³ : 2* ← - bis GA: NF, BM, PF oder AS: 3* ←
- weiss/hellgrau:	- bis+mit GA: FW, KW, 3HG oder VK: → - Einmündung bedeutendes SG: → - $E-I_{akk}$: 5-20: → 20-50: 2* → >50: 3* →

Abb. 10-31: Zeile H in der Gerinne-Beurteilungsmatrix

Im **automatisierten Geschiebeabschätzverfahren** wird die Hilfstabelle in Abb. 10-30 im Hintergrund konsultiert. Dabei erfolgt eine allfällige Verschiebung gegen links in den Ablagerungsbereich (aufgrund des Textes in der Hilfstabelle) automatisch in der Grafik_Gerinne. Die Farbe des Feldes, dessen Fragen im Weiteren beantwortet werden müssen, wird dem/der Benutzer/in automatisch in einem Feld mitgeteilt. Das entsprechende Feld, in dem die nachfolgenden Antworten erfolgen müssen, wird auch in orange eingefärbt, so dass sofort klar wird, welche Einflussfaktoren beurteilt werden müssen. Da hier Angaben zum Hanginput oberhalb und im Gerinneabschnitt selber sowie zum $E-I_{akk}$ gemacht werden müssen, werden dem/der Anwender/in diese Werte automatisch berechnet und als Hilfestellung angegeben. Die Beurteilung erfolgt dann im farblich entsprechenden Feld, wo die Codes der verschiedenen Einflussfaktoren aufsummiert und im Feld eingetragen werden (vgl. Abb. 10-32).

Funktion und Quantifizierung bei Geschiebetrieb	Erosion/Ablagerung bei Geschiebetrieb	
	Falls Geschiebesammler vorhanden, ablagernde Kubatur in m ³ :	
	Beantworte die Fragen im folgendem Teil: Eingabehilfe: E-lakk:	weiss 12.2
	Eingabehilfe: Hanginput bis und mit GA:	0
	(Mehrfachantworten, Punkte addieren und Summe in oranges Feld eintragen) - bis+mit GA: NF Flutwelle, Kluftwasser, mehrere Mündungen, Verklausung: +1 - Einmündung bedeutendes Seitengerinne: +1 - E-lakk: 5-20: +1 20-50: +2 >50: +3	1
	(Mehrfachantworten, Punkte addieren und Summe in oranges Feld eintragen) - Hanginput bis+mit GA: 5'000-20'000 m ³ : -1 >20'000 m ³ : -2 - bis GA: NF Bastionsmoräne, Permafrost oder Ausräumung auf Stauhohizont: -3 - bis+mit GA: NF Flutwelle, Kluftwasser, mehrere Mündungen, Verklausung: +1 - Einmündung bedeutendes Seitengerinne: + 1 - E-lakk: 5-20: +1 20-50: +2 >50: +3	
	(Mehrfachantworten, Punkte addieren und Summe in oranges Feld eintragen) - Hanginput bis+mit GA: 5'000-20'000 m ³ : -1 >20'000 m ³ : -2 - bis GA: NF Bastionsmoräne, Permafrost oder Ausräumung auf Stauhohizont: -3	

Abb. 10-32: Zeile H im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

Falls in einem Gerinneabschnitt Ablagerungen zu erwarten sind, die nicht unbedingt durch die Neigungsverhältnisse erkannt werden (z.B. Geschiebesammler, Bogensperre, Hinterfüllung einer Furt etc.) kann der/die Anwender/in hier in das Geschiebeabschätzverfahren „eingreifen“. Er/sie kann im obersten Feld angeben, dass es sich um einen solchen Abschnitt handelt und direkt die Ablagerungskubatur anhand der Rückhaltekapazität des Geschiebesammlers eintragen. In diesem Fall wird diese Ablagerungskubatur berücksichtigt und es erfolgt keine Beurteilung der Zeile H wie sie oben beschrieben wurde.

Zeile I – Erosionsfördernde Einflussfaktoren bei Murgangauslösung

In Gerinneabschnitten, in denen ein Murgang ausgelöst wird, herrschen keine Ablagerungstendenzen. Für die Beurteilung der Erosionsleistung spielen somit nur erosionsfördernde Einflussfaktoren eine Rolle. Es sind dies allfällige Flutwellen oder Kluftwasseraustritte, die von oben kommen und nun zu einer Murgangauslösung führen, Einmündungen bedeutender Seitengerinne oder erhöhte E-lakk Werte. In Zeile I führt das Vorhandensein dieser erosionsfördernden Einflussfaktoren zu einer Verschiebung gegen rechts (vgl. Abb. 10-33). Es erfolgt wiederum, wie bei Zeile H, eine Aussummierung der vorhandenen Merkmale in Form der Verschiebungspfeile.

Erosion bei Murgangbildung
(Mehrfachantworten, Pfeile horizontal addieren, dann 2*!)
- von oben FW oder KW: 3*→
- Einmündung bedeutendes Seitengerinne in GA: →
- E-lakk 5-20: → 20-50: 2*→ >50: 4* →

Abb. 10-33: Zeile I in der Gerinne-Beurteilungsmatrix

Im **automatisierten Geschiebeabschätzverfahren** werden auch hier die Werte pro Einflussfaktor aufsummiert und eingetragen. Als Hilfestellung wird wiederum automatisch der E-lakk Wert als Grundlage berechnet (vgl. Abb. 10-34).

Erosion bei Murgangbildung	
(Mehrfachantworten, Punkte addieren und Summe in oranges Feld eintragen)	
- von oben NF Flutwelle oder Kluftwasser: +3	
- Einmündung bedeutendes Seitengerinne in GA: +1	
- E-lakk: 5-20: +1 20-50: +2 >50: +4	1
Eingabehilfe: E-lakk:	12.2

Abb. 10-34: Zeile I im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

Zeile J - Erosionsfördernde und erosionshemmende Einflussfaktoren bei Murgang

In allen Gerinneabschnitten, in denen von oben ein Murgang kommt, der im Gerinneabschnitt grundsätzlich weitergeführt werden kann, erfolgt nun auch hier die Beurteilung der erosionsfördernden und erosionshemmenden Einflussfaktoren. Das Vorgehen und die Hilfstabelle entsprechen genau denjenigen in Zeile H beim Transportprozess Geschiebetrieb, weshalb hier nicht mehr näher darauf eingegangen wird. Der Unterschied zu Zeile H liegt bei den Einflussfaktoren und deren Gewichtung (vgl. auch Abb. 10-35):

Im **dunkelgrauen** Bereich werden die gleichen Einflussfaktoren, nämlich geschiebebeeinflussende Negativfaktoren mit indirekter Beeinflussung und Hanginput oberhalb und im Gerinneabschnitt beurteilt und auch gleich gewichtet.

Im **hellgrauen** Bereich werden die gleichen Einflussfaktoren beurteilt wie beim Transportprozess Geschiebetrieb (geschiebebeeinflussende Negativfaktoren mit indirekter Beeinflussung, Hanginput oberhalb und im Gerinneabschnitt, $E-I_{akk}$ und Einmündungen bedeutender Seitengrinne). Diese werden nun aber ergänzt mit 3 weiteren relevanten Einflussfaktoren:

- Oberer Gerinneabschnitt im limitierten Lockermaterial oder Fels und einer Gerinneneigung > 60%: Beim Vorhandensein dieser Bedingung ist mit einer erosionsfördernden Wirkung zu rechnen, da es unterhalb von solchen wasserfallartigen Strecken bei Murgangtransport entweder zu Kolkbildung kommen kann, oder zu einer kurzzeitigen Ablagerung, danach durch rasche Wasserübersättigung des abgelagerten Schuttkörpers zu einer erneuten Auslösung eines Murgangs.
- Bildung eines neuen abflussbeeinflussenden Negativfaktors oder eines neuen geschiebebeeinflussenden Negativfaktors im Gerinneabschnitt selber: Diese Option wurde integriert, um die Kombination von Negativfaktoren, wie sie beispielsweise im Rotlauibach (4) beobachtet wurde, zu ermöglichen. Im Rotlauibach erfolgte oben in GA 3 die Auslösung eines Murgangs durch den Negativfaktor „Bastionsmoräne“, unten in GA 4 dann zusätzlich noch der Negativfaktor „Mehrere Mündungen“. Bei einer Neubildung der Beurteilung von GA 4 mit dem Abschätzverfahren würde die Beurteilung so aussehen, dass in Zeile D die Möglichkeit „ja, es kommt ein Murgang von oben, ausgelöst durch den Negativfaktor Bastionsmoräne“ gewählt würde. Nach der Bestätigung eines Weitertransports in Zeile E würde nun in Zeile J das Beurteilungskriterium „im GA NF 3HG“ gewählt, was bedeutet, dass nun zusätzlich noch der Negativfaktor „Mehrere Mündungen“ 3HG aktiv wird. Der Verschiebungsbetrag gegen rechts ist dabei mit 8 bis 10 Feldern sehr hoch, und nur dadurch können extreme Erosionsleistungen in der Beurteilungsmatrix erreicht werden. Die genaue Zahl des Verschiebungsbetrags im vorgegebenen Bereich kann vom Anwender/in in seinem/ihrer eigenen Ermessensspielraum gewählt werden.

Im **weissen** Bereich erfolgen wiederum nur die Beurteilungen der erosionsfördernden Einflussfaktoren. Grundsätzlich sind es dieselben wie im hellgrauen Bereich. Einzig der akkumulierte Energie-Index $E-I_{akk}$ wird stärker gewichtet. Es wird davon ausgegangen, dass in steilen Abschnitten ein hoher $E-I_{akk}$ Wert weitaus grössere Erosionsleistungen bewirken kann als in flacheren Abschnitten im hellgrauen Bereich.

Erosion/Ablagerung bei Murgangtransport	
<i>(Mehrfachantworten, Pfeile horizontal addieren, dann ↓)</i>	
- Ablagerungstendenz (Vgl. J1, Spaltenangabe und Feldfarbe)	
- dunkel-/hellgrau:	- Hanginput bis+mit GA: 5'000-20'000 m ³ : ← >20'000 m ³ : 2* ← - bis GA: NF, BM, PF oder AS: 3* ←
- hellgrau:	- GA oberhalb F/LML mit J _{GA} > 60% → - E-I _{akk} : 5-20: → 20-50: 2* → >50: 3* →
- weiss/hellgrau:	- im GA: FW, KW, 3HG od. VK: 8 bis 10* → - im GA: BM, PF od. AS: 10 bis 15* → - Einmündung bedeutendes SG in GA: →
- weiss:	- E-I _{akk} : 5-20: → 20-50: 3* → >50: 6* →

Abb. 10-35: Zeile J in der Gerinne-Beurteilungsmatrix

Im **automatisierten Geschiebeabschätzverfahren** ist das Vorgehen genau gleich wie bei Zeile H, weshalb hier nicht näher darauf eingegangen wird. Es besteht auch hier die Möglichkeit, allfällige Geschiebeablagerungen in Geschiebesammlern direkt einzutragen.

Erosion/Ablagerung bei Murgangtransport	
Falls Geschiebesammler vorhanden, ablagernde Kubatur in m ³ :	
Beantworte die Fragen im folgenden Teil: Eingabehilfe: E-lakk: Eingabehilfe: Hanginput bis und mit GA:	hellgrau 35.3 0
<i>(Mehrfachantworten, Punkte addieren und Summe in oranges Feld eintragen)</i>	
- im GA: NF, Flutwelle, Kluftwasser, mehrere Gerinnemündungen oder Verklausung: +8 bis +10 - im GA: NF Bastionsmoräne, Permafrost oder Ausräumung auf Stauhorizont: +10 bis +15 - Einmündung bedeutendes Seitengerinne in GA: +1 - E-I _{akk} : 5-20: +1 20-50: +3 >50: +6	
<i>(Mehrfachantworten, Punkte addieren und Summe in oranges Feld eintragen)</i>	
- Hanginput bis+mit GA: 5'000-20'000 m ³ : -1 >20'000 m ³ : -2 - oberhalb GA: NF Bastionsmoräne, Permafrost oder Ausräumung auf Stauhorizont: -3 - GA oberhalb Felsabschnitt oder LML mit J _{GA} > 60%: +1 - E-I _{akk} : 5-20: +1 20-50: +2 >50: +3 - im GA: NF Flutwelle, Kluftwasser, mehrere Mündungen oder Verklausung: +8 bis +10 - im GA: NF Bastionsmoräne, Permafrost oder Ausräumung auf Stauhorizont: +10 bis +15 - Einmündung bedeutendes Seitengerinne in GA: +1	3
<i>(Mehrfachantworten, Punkte addieren und Summe in oranges Feld eintragen)</i>	
- Hanginput bis+mit GA: 5'000-20'000 m ³ : -1 >20'000 m ³ : -2 - bis GA: NF Bastionsmoräne, Permafrost oder Ausräumung auf Stauhorizont: -3	

Abb. 10-36: Zeile J im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

10.9.4 Beurteilung der Einflussfaktoren-Kombination (Zeile K)

Jede Kette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied. Analog kann in einem Gerinneabschnitt nur so viel Geschiebe mobilisiert werden wie ihr limitierendster Einflussfaktor es zulässt. In den oberen Beurteilungsschritten wurde das Geschiebelieferungspotenzial beurteilt aufgrund einer separaten Betrachtung aller einzelnen Einflussfaktoren. Nun gilt es aber noch, deren kombiniertes Wirken zu betrachten und zu beurteilen, ob einer dieser Faktoren im Zusammenspiel mit den anderen Faktoren eine Limite bildet, die die Geschiebemobilisierung im Gerinne ab einem gewissen Grenzwert unterbindet. Die krassste Form einer solchen Limite ist ein Gerinneabschnitt im anstehenden Fels. Es kann ein noch so grosser Murgang von oben kommen, der Gerinneabschnitt kann noch so steil sein und die erosionsfördernden Faktoren können noch so gross sein: wo kein Lockermaterial zur Mobilisierung vorhanden ist, kann auch nichts mobilisiert werden. Es bestehen jedoch auch andere, weniger offensichtliche Limiten, z.B. aufgrund der Einzugsgebietsfläche, resp. dem Abflussangebot. Wenn in einem Gerinneabschnitt alle

Voraussetzungen für die Bildung eines Murgangs durch Sohlenverflüssigung vorhanden sind, führt eine sehr kleine Einzugsgebietsfläche und dadurch ein limitierter Abfluss trotz dem eigentlich grossen Potenzial für Erosion durch seine limitierte Transportkraft zu einer bescheidenen Erosionsleistung. Solche Effekte gilt es nun im vierten Block der Beurteilungsmatrix zu berücksichtigen.

In diesem Block wird mittels einer Hilfstabelle (vgl. Abb. 10-37) die gesamte Einflussfaktoren-Kombination betrachtet. Durch eine Beurteilung aller relevanter Einflussfaktoren nach einer fix definierten Reihenfolge erfolgt eine Beurteilung der Limite in den Spalten der Beurteilungsmatrix, die bei der gegebenen Einflussfaktor-Kombination nicht überschritten werden kann. Liegt die bisherige Beurteilung des Potenzials aufgrund der separaten Betrachtung der einzelnen Einflussfaktoren (Beurteilung Spalten A-J) unterhalb dieser definierten Limite, kann die Beurteilung so übernommen werden. Liegt sie oberhalb dieser definierten Limite, heisst dies, dass die Beurteilung zu pessimistisch war und aufgrund der Kombination der Einflussfaktoren und deren limitierenden Bedingungen gegen unten korrigiert werden muss. Die Stärke der einzelnen Kettenglieder wurde somit als sehr gross erachtet, bei ihrer kombinierten Wirkung zeigt sich nun aber, dass ein Glied schwächer ist als die anderen und die gesamte Kette dadurch weniger Gewicht tragen kann.

	J_{GA}	0-10%			>10%					
		LM-Angebot Transportprozess Negativfaktoren Verbau VB	egal	GT egal	LMUL		LML/VB			F egal egal egal
					MG ohne	MG mit	GT egal egal	MG		
								ohne	mit	
$A_{EG} [km^2]$:	0.025 – 0.1	S 7	S 8	S 11	keine	S 8	S 8	S 8	S 7	
	0.1 – 0.5	S 7	S 9	S 16	keine	S 9	S 9	S 15	S 7	
	0.5 – 1	S 7	S 11	S 19	keine	S 10	S 10	S 16	S 7	
	1 – 2	S 8	S 13	S 20	keine	S 11	S 11	S 17	S 7	
	2 – 5	S 9	S 16	S 21	keine	S 12	S 12	S 18	S 7	
	5 - 10	S 9	S 19	S 22	S 25	S 13	S 13	S 19	S 7	

Abb. 10-37: Hilfstabelle zur Definition der Limite aufgrund der Einflussfaktoren-Kombination

Das folgende **Beispiel** soll die Anwendung zeigen:

In einem Gerinneabschnitt mit einer Gerinneneigung von J_{GA} 56%, im unlimitierten Lockermaterial LMUL gelegen und einer Einzugsgebietsfläche von $0.08 km^2$ und einem $E-I_{akk}$ von 0 wird ein Murgang ausgelöst. Die grafische Beurteilung ist in Abb. 10-38 ersichtlich.

Oberhalb von Zeile K (in Zeile J) liegt die Beurteilungslinie aufgrund der Beurteilung in Spalte Nr. 17, was einer Erosionsleistung von $10 m^3/m$ entsprechen würde. Nun erfolgt die Beurteilung der Einflussfaktoren-Kombination in Zeile K. Von oben nach unten werden in der Hilfstabelle die Kriterien gewählt (vgl. Abb. 10-39). Die Gerinneneigung ist $> 10\%$, das Lockermaterial LMUL (Lockermaterial unlimitiert), der Transportprozess ist Murgang (MG) und es gibt keine Negativfaktoren (ohne). Die Spalte in der Hilfstabelle ist somit definiert. Nun wird die Zeile anhand der Einzugsgebietsfläche A_{EG} gewählt. $0.08 km^2$ bedeutet die Wahl der ersten Zeile in der Hilfstabelle. Der entsprechende Limiten-Wert in der Hilfstabelle ist somit S11. Dies bedeutet, dass der betreffende Gerinneabschnitt aufgrund seiner Bedingungen keine Erosionsleistung bringt, die weiter rechts von Spalte 11 in der Beurteilungsmatrix liegt. Wie aber aufgrund der Beurteilung der Zeilen A bis J in Abb. 10-38 ersichtlich wurde, befindet sich die Beurteilungslinie in Spalte 17 und liegt somit über der maximal möglichen Limite von Spalte 11. Aus diesem Grund muss die Beurteilung angepasst und zurück auf Spalte 11 verschoben werden, was in der Beurtei-

lungslinie mit einem Verlauf gegen links bis Spalte 11 ersichtlich ist (gelber Kreis in Abb. 10-38). Spalte 11 bedeutet nun nicht mehr eine Erosionsleistung von 10 m³/m, sondern lediglich 4 m³/m. Wäre die Beurteilungslinie anhand der Beurteilung der Zeilen A bis J in einer niedrigeren Spalte gewesen, als die Limite in Zeile K beträgt, wäre sie so beibehalten worden, da die effektive Abschätzung unter der maximal möglichen Erosionsleistung gelegen wäre.

Beurteilung		Hilfstabellen		1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35																																					
Einzugsgebietsgröße A _{EG} [km ²]	0,025-0,1	0,1-0,5	0,5-1	1-2	2-5	>2																																			
	Gerinneneigung J _{GA} [%]																																								
Steinverteilung	0-10 → 10-20 → 20-40 → >40																																								
	Lockermaterialangebot																																								
Fels (F)	LM limitiert (LM oder VB) → LM unlimitiert (LMUL) 2' →																																								
	Murgangprozess von oben?																																								
Transportprozess	ja: 6' → 5' → nein: 2' → ja durch: - Sohlenverfestigung od. aus Hangmure: - NF FW, KW, 3HG, VK: 4' → - NF BM, PF, AS od. GR: mit 2' →, ohne 5' →, Zwischenablagung																																								
	Weitertransport als Murgang? (Vgl. E1 und E2)																																								
Murgangbildung in Gerinne oder Hang?	ja: 6' → 5' → nein: 2' →																																								
	Murgangbildung durch VK?																																								
Erosion/Abtragung bei Geschiebetrieb	Mehrfachantworten: Pfeile horizontal addieren, dann 2' →																																								
	Erosion/Abtragung bei Murgangtransport																																								
Limit aufgrund Einflussfaktoren-Kombination	1. Bedingungen eingrenzen und dadurch Spalte wählen																																								
	2. A _{EG} wählen																																								
3. Limit-Spalte ablesen																																									
4. Falls Beurteilungslinie rechts von Limit-Spalte, zurück zur Limit-Spalte																																									
Geschiebeabschätzverfahren nach Gertsch (2009)																																									
Gerinne-Beurteilungsmatrix																																									

Abb. 10-38: Verlauf der Beurteilungslinie in der Gerinne-Beurteilungsmatrix im Beispiel

A _{EG} [km ²]:	→	J _{GA} 0-10%		10-20%		20-40%		>40%		F
		LM-Angebot		LMUL		LML/VB		F		
		Transportprozess		MG		MG				
		Negativfaktoren		ohne		mit				
Verbau VB		egal		egal						
0,025 – 0,1		S 7	S 8	S 11	keine	S 8	S 8	S 8	S 7	
0,1 – 0,5		S 7	S 9	S 16	keine	S 9	S 9	S 15	S 7	
0,5 – 1		S 7	S 11	S 19	keine	S 10	S 10	S 16	S 7	
1 – 2		S 8	S 13	S 20	keine	S 11	S 11	S 17	S 7	
2 – 5		S 9	S 16	S 21	keine	S 12	S 12	S 18	S 7	
5 – 10		S 9	S 19	S 22	S 25	S 13	S 13	S 19	S 7	

Abb. 10-39: Hilfstabelle zur Definition der Limite aufgrund der Einflussfaktoren-Kombination

Die Kalibrierung der Hilfstabelle wurde aufgrund der Datenanalysen festgelegt:

Bei Gerinneneigungen < 10% wurde festgelegt, dass bei Einzugsgebietsflächen < 1 km² keine Erosion möglich ist (Limite Spalte 7), bei grösseren Einzugsgebietsflächen mit mehr Abfluss eine Erosionsleistung bis 2 m³/m (Limite Spalte 9) möglich ist.

Bei Felsgerinnen steht kein Lockermaterial zur Verfügung, die Erosionsleistung kann somit in keinem Fall > 0 sein (Limite Spalte 7).

Bei unlimitiertem Lockermaterial wirkt der Transportprozess limitierend. Bei Geschiebetrieb wurden keine Erosionsleistungen $> 15 \text{ m}^3/\text{m}$ beobachtet, weshalb auch bei grossen Einzugsgebietsflächen und somit grossen Abflüssen die Limite bei Spalte 19 liegt, also einer maximalen Erosionsleistung von $15 \text{ m}^3/\text{m}$. Bei Murgangtransport spielen allfällige Negativfaktoren eine Rolle. Während das Vorhandensein von Negativfaktoren praktisch keine Grenze für Erosionsleistungen bedeutet (keine Limite), ausser bei sehr grossen Einzugsgebietsflächen (Lime Spalte 25), haben Gerinneabschnitte mit Murgängen unbeeinflusst durch Negativfaktoren nie Erosionsleistungen deutlich $> 30 \text{ m}^3/\text{m}$ gezeigt. Die Limite wurde hier bei der grössten Einzugsgebietsflächen-Klasse und somit bei grossen Abflüssen auf Spalte 22, also einer maximal möglichen Erosionsleistung von $25 \text{ m}^3/\text{m}$ gelegt.

Bei Gerinneabschnitten im limitierten Lockermaterial oder solchen mit Sperren (VB) ist die Festlegung von Limiten schwieriger. Einerseits wird einmal unterteilt in den Transportprozess Geschiebetrieb (GT) und Murgang (MG). Bei Geschiebetrieb wirken sowohl der Transportprozess an sich als auch das limitierte Lockermaterialangebot limitierend, bei Murgangtransport eher nur das limitierte Lockermaterialangebot. Negativfaktoren haben keinen grossen Einfluss, da sie durch das limitierte Lockermaterial unterbunden werden. Jedoch spielt die Menge an verfügbarem Lockermaterial eine Rolle. Bei natürlich limitiertem Lockermaterialangebot ist diese Menge an mobilisierbarem Lockermaterial unter Umständen sehr klein, in Sperrentreppen kann sie durch grössere Hinterfüllungen der Sperren grösser sein. So wurden etwa beim Grossereignis im Glyssibach (1) sehr grosse Kubaturen aus den Zwischendeponien hinter den Sperren mobilisiert. Aus diesem Grund liegen die Limiten bei Murgangtransport im Falle von Sperren höher als im Fall von natürlich limitiertem Lockermaterial. Die Limiten verschieben sich beim limitierten Lockermaterial zudem mit steigender Einzugsgebietsfläche nach rechts. Es wird davon ausgegangen, dass mit steigender Einzugsgebietsfläche die mittlere Sohlenbreite zunimmt und dadurch mehr limitiertes Lockermaterial mobilisiert werden kann.

Im **automatisierten Geschiebeabschätzverfahren** erfolgt die Beurteilung der Einflussfaktor-Kombination und somit der Limite vollautomatisch. Sämtliche benötigten Werte zur Festlegung der maximal möglichen Erosionsleistung können aus den Beurteilungsschritten der Zeilen A bis J automatisch identifiziert werden und dadurch wird die Festlegung der Limite im Hintergrund selbständig durchgeführt. Die Spaltennummer der Limite wird dem/der Benutzer/in in einem grauen Feld mitgeteilt und in der Beurteilung als auch auf der Grafik automatisch dargestellt (vgl. Abb. 10-40).

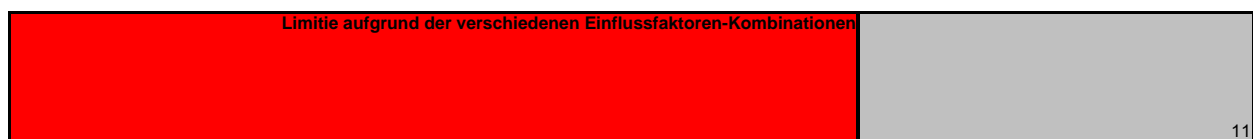


Abb. 10-40: Zeile K im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

10.9.5 Quantifizierung

Nachdem nun die Beurteilung der Gerinneprozesse im Gerinneabschnitt abgeschlossen ist, erfolgt die Quantifizierung. Aus der Spalte, in der sich die Beurteilungslinie in der Beurteilungsmatrix nach Zeile K befindet, kann nun direkt die Quantifizierung in Zeile L erfolgen. In den Spalten 1 bis 6 liegt der Gerinneabschnitt im Ablagerungsbereich, in Spalte 7 im Transitbereich und in Spalten 8 bis 35 im Erosionsbereich (vgl. Abb. 10-41).

K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35			
	L	0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	17	20	25	30	40	50	60	70	80	90	105	120	135	150	200	250		
M	ABLAGERUNG Anteil der Fracht							EROSION Netto-Erosionsleistung [m ³ /m]																														

Abb. 10-41: Quantifizierung in Zeile L in der Gerinne-Beurteilungsmatrix

Im Ablagerungsbereich wird der Ablagerungsfaktor als Mass für die Quantifizierung in Zeile L verwendet. Der Ablagerungsfaktor ist der Anteil Geschiebe, der von der oberhalb des Gerinneabschnitts anfallenden Geschiebefracht im Gerinneabschnitt abgelagert wird. Ein Ablagerungsfaktor von 0.3 bei einer Geschiebefracht bis oberhalb des Gerinneabschnitts von 10'000 m³ bedeutet also, dass im Gerinneabschnitt nun 3'000 m³ Geschiebe abgelagert werden. Für die Geschiebebilanz des Gerinnebereichs in einem Ablagerungsabschnitt muss somit die gesamte Geschiebefracht aus den oberen Gerinneabschnitten bekannt sein.

Im Transit- und Erosionsbereich wird in Zeile L die Erosionsleistung m³/m als Mass für die Quantifizierung verwendet. Um eine Geschiebebilanz im Gerinne zu erhalten, muss dieser Wert somit noch mit der Länge des Gerinneabschnitts multipliziert werden. Im Geschiebeabschätzverfahren wird sie mit der horizontalen Gerinnelänge multipliziert, was eigentlich nicht absolut korrekt ist. Aber sämtliche Auswertungen zu den beobachteten Erosionsleistungen in den Analysebächen wurden ebenfalls rasterbasiert im GIS mit der horizontalen Länge gemacht. Die Kalibrierung erfolgte somit auch bereits mit diesem Mass.

Im **automatisierten Geschiebeabschätzverfahren** werden diese Berechnungen automatisch gemacht und in einem Fazit dem/der Anwender/in in einem grauen Kasten aufgelistet.

Funktion:	Erosion
Ablagerung:	
Ablagerung in diesem Gerinneabschnitt [m ³]:	
Erosionsleistung [m ³ /m]:	4
Erosion in diesem Gerinneabschnitt [m ³]:	714
Geschiebefracht nach diesem Gerinneabschnitt [m ³]:	714

Abb. 10-42: Quantifizierung im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

Die Beurteilung der Gerinneprozesse ist somit abgeschlossen. Die gesamte Beurteilung kann im Tabellenblatt „Grafik_Gerinne“ grafisch betrachtet und allenfalls ausgedruckt werden. Dabei wird sie automatisch beschriftet mit dem Bachnamen, Szenariobeschrieb und Datum aus der Eingabemaske. Ein Beispiel einer solchen Grafik mit der Darstellung der verschiedenen Gerinneabschnitte ist in Abb. 10-43 ersichtlich.

Gröfenbach, Lauterbrunn

SZP: GT, Hangrutsch Frontalbereich

Eva Gertsch, 17.11.2008

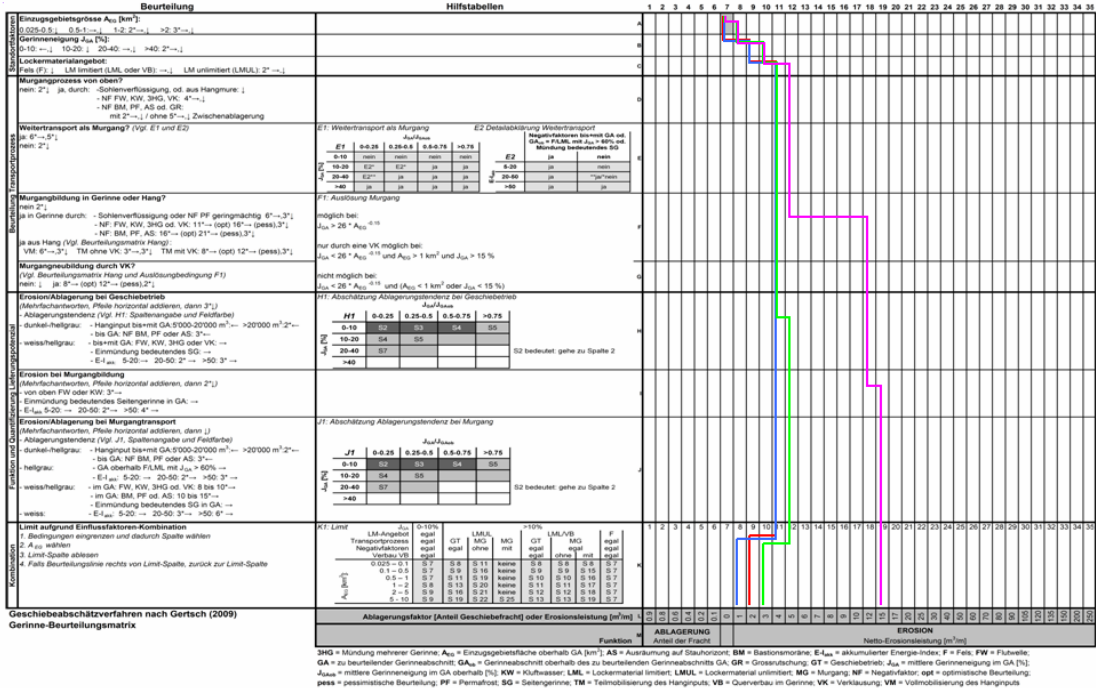


Abb. 10-43: Grafische Darstellung der Gerinneprozesse im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

10.10 Fazit und Abschätzung der gesamten Geschiebefracht

Nun gilt es, pro Gerinneabschnitt die Geschiebebilanz aus den beurteilten Hangprozessen mit denjenigen aus der Gerinnebeurteilung zu addieren und diese Geschiebebilanzen pro Gerinneabschnitt bis zum Kegelhals aufzusummieren. Dann ist die Beurteilung und Quantifizierung für ein gegebenes Szenario abgeschlossen und die Geschiebefracht am Kegelhals bekannt.

Bei der schlussendlichen Zahl der Geschiebefracht am Kegelhals empfiehlt sich eine grosszügige Rundung oder sogar eine Angabe der Geschiebefracht in einer Bandbreite. So kann vermieden werden, dass durch sehr exakte Zahlen eine Genauigkeit der Abschätzung vorge-täuscht wird, die so nicht vorhanden ist.

Im **automatisierten Geschiebeabschätzverfahren** ist dem Fazit und der Abschätzung der gesamten Geschiebefracht das Tabellenblatt „Fazit“ gewidmet (vgl. Abb. 10-44).



Abb. 10-44: Tabellenblatt „Fazit“ im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

Hier werden zuerst der Name des Bachs, das angenommene Szenario und der Bearbeiter oder die Bearbeiterin angezeigt. Danach folgt eine Tabelle mit den wichtigsten Inputparametern und Ergebnissen zu den Berechnungen aufgrund des gewählten Szenarios (vgl. Abb. 10-45):

Geschiebeabschätzung Grossereignis nach Gertsch (2009)																
Bach, Gemeinde:		Steinbach, Flüfli														
Szenario:		wo möglich MG, mit wenig Hanginput														
Bearbeiter/in, Datum:		Eva Gertsch, 15.11.2008														
Gerinneabschnitt	Horizontale Gerinnelänge [m]	Einzugsgebietsfläche oberhalb A _{EG} [km ²]	mittlere Gerinneneigung J _{GA} [%]	Lockermaterialangebot	J _{GA} J _{GA} ob	Akkumulierter Energie-Index E-Jahk	Geschiebeförderung aus dem Hang [m ³]	mobilitäts Hanginput in Gerinne [m ³]	Transportprozess im Gerinne	Funktion des Gerinneabschnitts	Ablagerungsfaktor	abgelagerte Kubatur [m ³]	Erosionsleistung [m ³ /m]	erodierte Kubatur [m ³]	Geschiebebilanz im Gerinneabschnitt [m ³]	aufsummierte Geschiebefracht nach diesem Gerinneabschnitt [m ³]
1	485	0.14	27.4	unlimitiert	1.00	0.0	0	0	GT	Erosion			2	970	970	970
2	656	0.32	18.8	unlimitiert	0.68	0.0	0	0	GT	Erosion			2	1312	1312	2282
3	298	0.44	23.2	unlimitiert	1.00	0.0	0	0	GT	Erosion			2	596	596	596
4	744	1.07	16.9	unlimitiert	0.81	0.0	200	200	GT	Erosion			5	3720	3920	6798
5	542	0.29	26.0	unlimitiert	1.00	0.0	0	0	GT	Erosion			2	1084	1084	1084
6	548	1.68	20.3	unlimitiert	0.94	0.0	500	500	GT	Erosion			6	3288	3788	11670
7	175	0.24	49.7	unlimitiert	1.00	0.0	0	0	MG	Erosion			9	1575	1575	1575
8	148	3.00	12.8	unlimitiert	0.37	0.0	0	0	GT	Ablagerung	0.1	1324.5			-1325	11921
9	463	0.17	31.7	unlimitiert	1.00	0.0	0	0	GT	Erosion			2	926	926	926
10	520	3.32	10.8	unlimitiert	0.48	3.0	200	200	GT	Ablagerung	0.1	1284.65			-1285	11562
11	286	0.32	34.6	unlimitiert	1.00	0.0	0	0	MG	Erosion			9	2574	2574	2574
12	177	4.36	13.0	unlimitiert	0.57	6.3	0	0	MG	Erosion			17	3009	3009	17145
															Geschiebefracht am Kegelhals [m ³]:	17'100

Abb. 10-45: Fazit der Geschiebeabschätzung im automatisierten Geschiebeabschätzverfahren

- Nr. des Gerinneabschnitts
- Horizontale Gerinnelänge [m]
- Einzugsgebietsfläche oberhalb A_{EG} [km²]
- Mittlere Gerinneneigung J_{GA} [%]
- Lockermaterialangebot

- Verhältnis der Gerinneneigung zu jener im Gerinneabschnitt oberhalb J_{GA}/J_{GAob}
- Akkumulierter Energie-Index $E-I_{akk}$
- Geschiebelieferung aus dem Hang [m^3]
- Mobilisierter Hanginput im Gerinne [m^3]
- Transportprozess im Gerinne
- Funktion des Gerinneabschnitts
- Ablagerungsfaktor [-]
- Abgelagerte Kubatur [m^3]
- Erosionsleistung [m^3/m]
- Erodierte Kubatur [m^3]
- Geschiebebilanz im Gerinneabschnitt [m^3]
- Aufsummierte Geschiebefracht nach diesem Gerinneabschnitt [m^3]

Nach der Beurteilung eines bestimmten Szenarios kann der/die Anwender/in die Datei unter anderem Namen abspeichern und durch Anpassung der Werte im Beurteilungs-Tabellenblatt andere Szenarien berechnen. Bei sich stark unterscheidenden Szenarien empfiehlt es sich, bereits unmittelbar nach dem Ausfüllen der Eingabemaske eine Kopie zu speichern.

Das Fazit, sowie die Grafiken mit den Darstellungen der Beurteilung in Hang und Gerinne können ausgedruckt oder in einen Technischen Bericht kopiert werden.

10.11 Automatisiertes Geschiebeabschätzverfahren

In den obigen Kapiteln wurde die komplexe Entwicklung des Geschiebeabschätzverfahrens detailliert beschrieben und begründet. Es wurde aber ersichtlich, dass durch die Programmierung des automatischen Geschiebeabschätzverfahrens die meisten Arbeitsschritte stark automatisiert und dadurch zeitlich abgekürzt werden konnten und pro Gerinneabschnitt nur noch wenige Entscheidungen und Eingabewerte von Hand gemacht werden müssen. Durch die Darstellung der Beurteilungslinien auf den Beurteilungsmatrixen in den Grafiken ist das Vorgehen aber trotzdem nachvollziehbar dargestellt.

Die zeitintensivsten Arbeiten bei der Anwendung des Abschätzverfahrens sind die Aufbereitung der digitalen Grundlagendaten, die Abgrenzung des Einzugsgebiets und der Gerinneabschnitte und das Extrahieren der Inputparameter. Dabei ist bei einer einmaligen Anwendung die Vorgehensweise GIS-Raster zeitaufwändiger, aber dafür auch genauer als die Vorgehensweise GIS-Vektor. Bei mehrmaliger Anwendung können durch die Programmierung von amls oder Python-skripts die einzelnen Arbeitsschritte in der GIS-Raster Vorgehensweise abgekürzt werden. Sobald die benötigten Eingabewerte pro Gerinneabschnitt vorhanden sind (Länge des Gerinneabschnitts, Einzugsgebietsfläche oberhalb A_{EG} , Lockermaterialangebot und Höhe des obersten Punkts), ist eine Beurteilung und Anwendung eines vordefinierten Szenarios mittels dem automatisierten Geschiebeabschätzverfahren in kurzer Zeit erreicht. Für grobe Abschätzungen können diese an sich einfachen Inputparameter allenfalls auch ohne GIS implementiert werden.

Das automatisierte Abschätzverfahren wurde für die Beurteilung der 43 Validierungsgebiete anhand von 82 verschiedenen Szenarien durchgeführt. Dadurch sollten allfällige Programmierungsfehler grösstenteils eliminiert worden sein. Alle diese Anwendungen sowie eine leere Version der Anwendung sind auf der CD abgespeichert und können als Fallbeispiele verschiedener Anwendungen betrachtet werden.

11 Validierung und Sensitivitätsanalyse

11.1 Validierung an abgelaufenen Grossereignissen – Stufe 1

Wie in Kap. 3.2 und 3.6.2 beschrieben, wurde das in Kap. 10 vorgestellte Geschiebeabschätzverfahren in einer ersten Stufe an weiteren 20 Grossereignissen getestet. Dabei wurden die bekannten, während den tatsächlichen Grossereignissen abgelaufenen Geschiebeprozesse mittels des Geschiebeabschätzverfahrens simuliert. Die erhaltenen Geschiebebilanzen pro Gerinneabschnitt, resp. Geschiebefrachten am Kegelhals wurden anschliessend mit den tatsächlichen Werten verglichen. Dabei wurde bei Angaben der Geschiebefrachten der tatsächlichen Grossereignisse in den Ereignisdokumentationen in Bandbreiten jeweils der Mittelwert als Richtwert oder „wahrer“ Wert verwendet. Wenn in einer Abschätzung in der Ereignisdokumentation die Werte 10'000 bis 15'000 m³ standen, wurde also als Richtwert 12'500 m³ verwendet. Die Ergebnisse zu jedem Ereignis-Validierungsbach sind im Anhang A (Factsheets Nr. 59 bis 78) ersichtlich. Die verwendeten Inputparameter und die detaillierte Beurteilungen mit dem automatisierten Geschiebeabschätzverfahren können auf der CD nachvollzogen werden.

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass rein qualitativ betrachtet praktisch alle abgelaufenen Geschiebeprozesse mit dem Geschiebeabschätzverfahren simuliert werden konnten. Wo bei den Grossereignissen Murgänge abgingen, konnte das aufgrund der naturräumlichen Bedingungen und den definierten Schwellenwerten für eine Murgangbildung auch so simuliert werden. Einzig beim Grossereignis im Minstigerbach (77), wäre laut Abschätzverfahren der Murgang vom Minstigergletscher her auf der Flachstrecke im Mittellauf gestoppt und das Geschiebe anschliessend mittels Geschiebetrieb bis nach Münster transportiert worden.

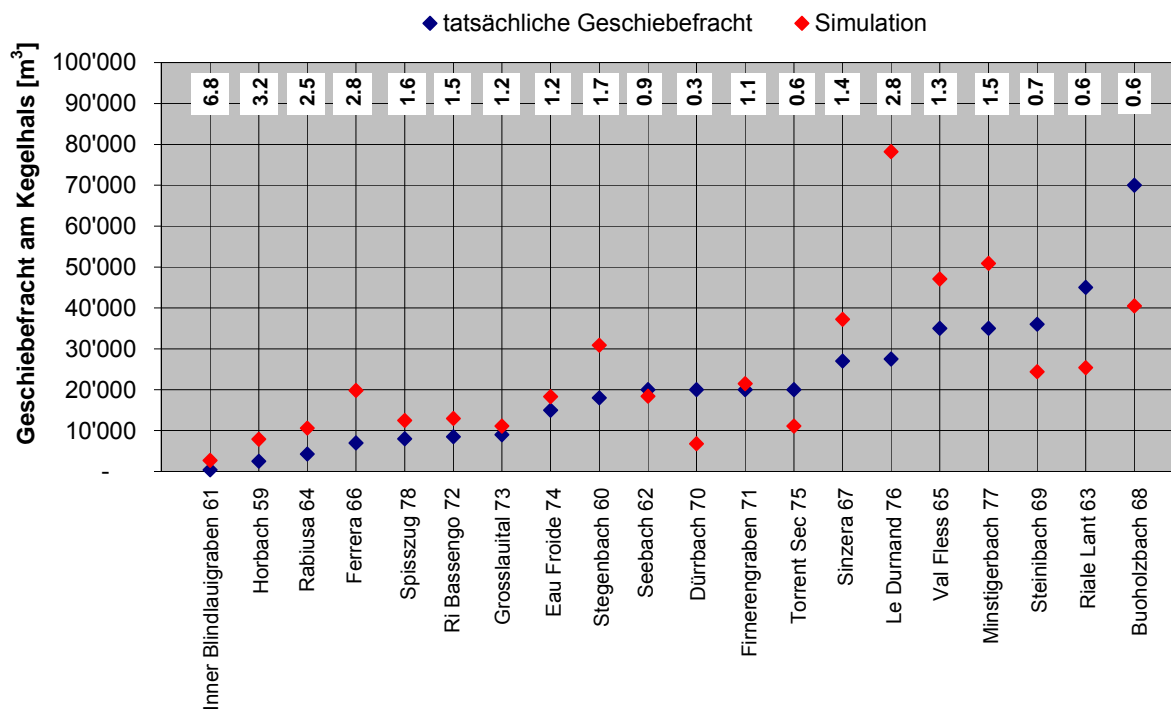


Abb. 11-1: Vergleich zwischen den tatsächlichen (blau) und den simulierten (rot) Geschiebefrachten der Ereignis-Validierungsgebiete und Angabe des Verhältnisses Simulation/tatsächlicher Wert

Abb. 11-1 zeigt die quantitativen Ergebnisse dieser ersten Validierungs-Stufe. Dabei werden die tatsächlichen am Kegelhals angefallenen Geschiebefrachten in blau dargestellt, während die dazu gehörenden Simulationen in rot dargestellt sind. Zusätzlich ist das Verhältnis zwischen der Simulation und der tatsächlichen Geschiebefracht bei jedem Ereignis in einem weissen Textfeld angezeigt. Verhältnisse > 1 bedeuten eine Überschätzung, Verhältnisse < 1 bedeuten eine Unterschätzung der tatsächlichen Geschiebefrachten.

Bedenkt man, dass es sich auch bei den tatsächlichen Geschiebefrachten der abgelaufenen Grossereignisse um unsichere Abschätzungen handelt, liegen die simulierten Geschiebefrachten in den meisten Fällen in einem Abweichungs-Bereich, der als eine gute Abschätzung betrachtet werden kann. Die absoluten Abweichungen der Simulationen nehmen mit steigenden tatsächlichen Geschiebefrachten tendenziell zu. Dies ist zu erwarten angesichts der Unsicherheiten, die sich bei solchen Ereignissen ergeben.

Praktisch alle Grossereignisse mit Geschiebefrachten $< 20'000 \text{ m}^3$ wurden leicht überschätzt. Bei den Grossereignissen mit Geschiebefrachten $> 20'000 \text{ m}^3$ gab es sowohl Ereignisse, die überschätzt als auch solche, die unterschätzt wurden. Bei den meisten Ereignissen liegen die Simulationen jedoch nicht extrem weit von den Abschätzungen der Geschiebefrachten der tatsächlichen Ereignisse entfernt. Bei denjenigen Ereignissen mit grosser Diskrepanz konnten folgende Gründe identifiziert werden:

Deutlich unterschätzt wurden insbesondere die Geschiebefrachten im Dürrbach (70), Torrent Sec (75), Steinibach (69), Riale Lant (63) und Buoholzbach (68). Auffallend ist, dass sich darunter die 3 Bäche mit reinem Geschiebetransport und relativ grosser Einzugsgebietsfläche und langanhaltenden Niederschlägen als Auslöser befinden (Dürrbach (70) 18.6 km^2 ; Buoholzbach (68) 13.5 km^2 und Steinibach (69) 10.5 km^2). Insbesondere der Dürrbach und der Buoholzbach wiesen gerade in den unteren Gerinneabschnitten deutlich höhere Erosionsleistungen auf, als mittels des Geschiebeabschätzverfahrens simuliert wurde. Verstärkt wurde diese Erosion im Dürrbach noch mit dem Negativfaktor „Kluftwasser“, der im Abschätzverfahren jedoch seine Wirkung verliert, wenn die Gerinneneigung unter 10% sinkt. Bei den anderen beiden Bächen mit Unterschätzung kann gesagt werden, dass beim Riale Lant zusätzlich noch Schnee mobilisiert wurde, was einen Teil der Unterschätzung vielleicht erklären mag. Im Torrent Sec waren die im limitierten Lockermaterial gelegenen Steilrutschen möglicherweise stärker mit Lockermaterial gefüllt, als dies beim Abschätzverfahren berücksichtigt wird.

Deutlich überschätzt wurde das Ereignis im Le Durnand. Gründe dafür konnten nur ansatzweise gefunden werden. Im Le Durnand wurden nach dem Ereignis sehr grosse abgelagerte Blöcke beobachtet. Es könnte sein, dass diese während dem Ereignis über lange Zeit noch relativ stabilisierend gewirkt haben und aus der Sohle dadurch nicht ein Maximum an Erosionsleistung erreicht werden konnte.

11.2 Validierung an Geschiebe-Abschätzungen – Stufe 2

In Stufe 2 der Validierung wurden 23 Wildbäche zuerst mit dem Geschiebeabschätzverfahren beurteilt und dabei verschiedene Szenarien berechnet. Das genaue Vorgehen ist in Kap. 3.6.2 ersichtlich. Die Ergebnisse pro Bach sind auf den Factsheets Nr. 79 bis 101 im Anhang A dokumentiert. Die Inputparameter und sämtliche detaillierten Beurteilungen mit dem automatisierten Geschiebeabschätzverfahren sind auf der CD ersichtlich.

Von den Abschätzungs-Validierungsbächen wurden 12 mit der Vorgehensweise GIS-Raster Schreibtisch-basiert beurteilt (Aussagegenauigkeit Gefahrenhinweis-Stufe), 11 mit der GIS-Raster Feld-ergänzten Vorgehensweise (Aussagegenauigkeit Gefahrenkarten-Stufe). Die Schreibtisch-basierten Gebiete sind in Abb. 11-2 und Abb. 11-3 mit einem Stern gekennzeichnet.

Die Ergebnisse dieser Validierungsstufe sind in Abb. 11-2 zusammenfassend dargestellt. Dabei wurden pro Abschätzungs-Validierungsgebiet mindestens 2 und maximal 4 Szenarien durchgerechnet (die Szenarien sind in den Factsheets im Anhang A dokumentiert). Gerechnet wurden sog. „optimistische“ (SzO), „pessimistische“ Szenarien (SzP) sowie übrige „Szenarien X“ (SzX).

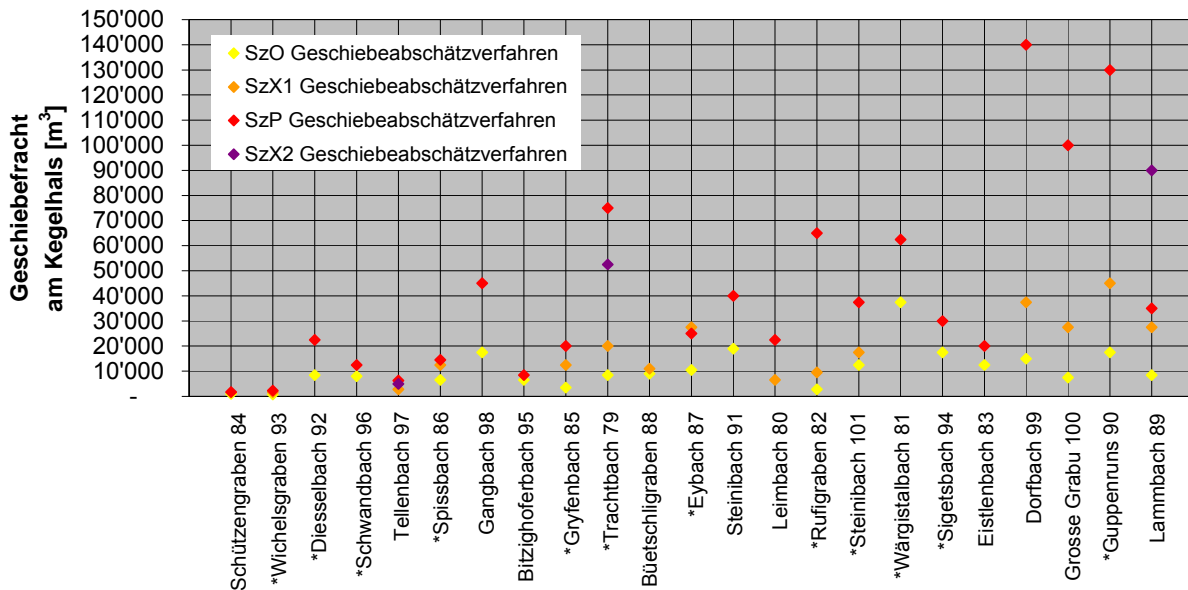


Abb. 11-2: Beurteilung verschiedener Szenarien in den Abschätzungs-Validierungsbächen mittels Geschiebeabschätzverfahren. * = Vorgehensweise Schreibtisch-basiert, ohne * = Feld-ergänzt

In den meisten Fällen wurde als SzO ein Grossereignis mit Geschiebetrieb angenommen, um die untere Grenze einer möglichen Geschiebefracht-Bandbreite abzugrenzen. Das Szenario SzX war in den meisten Fällen Murgangtransport, wo dieser aufgrund der vorherrschenden Bedingungen überhaupt möglich war. Im pessimistischen Szenario wurden dann meist noch zusätzliche Hangprozesse oder allfällige Negativfaktoren einbezogen. Negativfaktoren wurden beispielsweise im Trachtbach (Grossrutschung mit Verklauung (GRVK) und ohne Verklauung (GR)), Ruffigraben (Ausräumung auf Stauhorizont AS), Guppenruns (Flutwelle FW), Dorfbach Randa und Grosse Grabu (Murgangauslösung in aktiver Auftauschicht im Permafrost PF) angenommen. Bei diesen Wildbächen ist in der Grafik in Abb. 11-2 auch deutlich ersichtlich, dass die pessimistischen Szenarien durch die Auslösung von Schwellenprozessen aufgrund der Negativfaktoren sehr viel höhere Geschiebefrachten bringen, als die optimistischen SzO oder die restlichen SzX.

Um die Qualität dieser Abschätzungen einordnen zu können, wurden sie mit den Abschätzungen im Rahmen von Gefahrenkarten oder Integralprojekten verglichen. Falls nötig, wurden sie zuerst ergänzt mit Berechnungen derjenigen Szenarien, die in den Abschätzungen für die Gefahrenkarten definiert waren. Es gilt jedoch zu betonen, dass diese Vergleichswerte aus den Technischen Berichten zu Gefahrenkarten ebenfalls Abschätzungen sind, die grosse Unsicherheiten beinhalten und somit ebenso wenig die absolute Wahrheit darstellen. Die tatsächlich „wahren Werte“ können erst nach einem tatsächlich in der Natur abgelaufenen Grossereignis

definiert werden und auch da ist insbesondere eine Zuordnung der Jährlichkeit schwierig (vgl. Kap. 3.3.3.1). Bei Angaben von Bandbreiten bei den Abschätzungen der Gefahrenkarten wurden wiederum die Mittelwerte gebildet und diese als Richtwerte für den Vergleich verwendet.

Beim Studium der Technischen Berichte und Dokumente zu den Gefahrenkarten dieser Abschätzungs-Validierungsbäche (Quellen siehe jeweils Factsheet in Anhang A) zeigte sich, dass nicht in jedem Fall die Jährlichkeiten der Abschätzungen angegeben waren oder dass die Szenarien, mit welchen die Geschiebeabschätzungen erfolgt waren, nicht dokumentiert waren. In diesen Fällen ist ein direkter Vergleich zwischen den Berechnungen mittels Abschätzverfahren und den Abschätzungen in der Gefahrenkarte schwierig. Darum wurden für die graphische Darstellung der Vergleiche in Abb. 11-3 unterschiedliche Signaturen gewählt (vgl. Tab. 11-1):

Tab. 11-1: Legende zu Abb. 11-3

Abschätzung mit Geschiebeabschätz- verfahren	Abschätzung aus Gefahrenkarten oder Integralprojekten				
	Gleiches Szenario wie Geschiebeabschätzverfahren		Unbekanntes Szenario		
	100 jährlich	300 jährlich	100 jährlich	300 jährlich	Unbekannte Jährlichkeit
SzO „optimistisch“ ◆	△	□	△	□	✱
SzX1 „Szenario X1“ ◇	△	□			
SzP „pessimistisch“ ◆	△	□			
SzX2 „Szenario X2“ ◆	△	□			

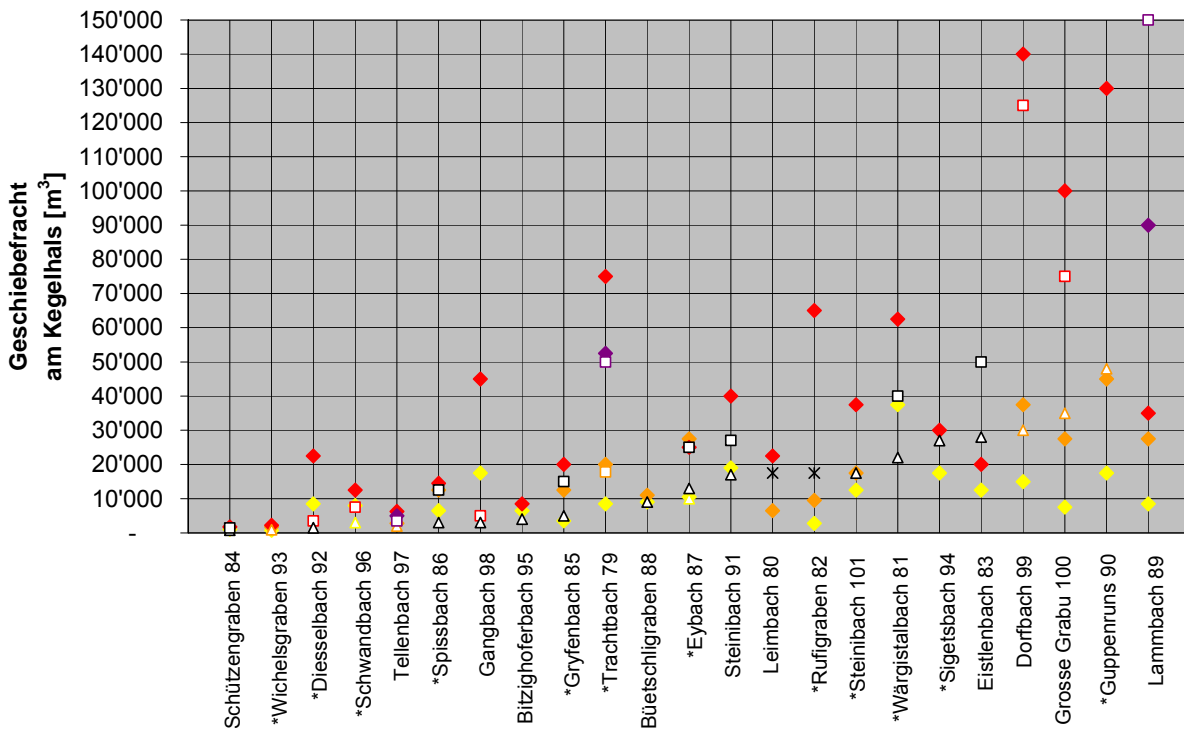


Abb. 11-3: Vergleich der Geschiebefrachten zwischen dem Geschiebeabschätzverfahren und Abschätzungen anlässlich von Gefahrenkartierungen in Abhängigkeit verschiedener Szenarien und Jährlichkeiten

11.2.1 Vergleich mit gleichen Szenarien

Im Prinzip können somit in Abb. 11-3 nur jeweils die Werte gleicher Farbe (gelb, orange, rot und violett) zwischen dem Abschätzverfahren und den Abschätzungen aus den Gefahrenkarten verglichen werden. Dies bedeutet, dass bei beiden Abschätzungen vom gleichen Szenario ausgegangen wurde. So kann z.B. beim Schwandbach (96) der rote Rhombus (SzP aus Geschiebeabschätzverfahren) mit dem roten Quadrat mit weisser Füllung (entsprechende Abschätzung für ein 300 jährliches Ereignis mit gleichem Szenario im Integralprojekt) verglichen werden.

Vergleicht man auf diese Art und Weise die Abschätzungen aus dem Geschiebeabschätzverfahren mit den Abschätzungen aus den Gefahrenkarten, wird ersichtlich, dass die Abschätzungen des Geschiebeabschätzverfahrens beim Wichelsgraben (93), Schwandbach (96), Tellenbach (97), Trachtbach (79), Dorfbach Randa (99), Grosse Grabu (100) und Guppenruns (90) relativ gut übereinstimmen. Beim Dorfbach Randa und Grosse Grabu wurden aufgrund der Unsicherheiten zur Auslösung von Murgängen im auftauenden Permafrostgebiet in den Gutachten Bandbreiten von 100'000 bis 150'000 m³ resp. 50'000 bis 100'000 m³ angegeben, was in der Abb. 11-3 mit der Darstellung des Mittelwerts nicht sichtbar ist.

Starke Abweichungen ergeben sich in den Bächen Diesselbach (92), Gangbach (86) und Lammbach (89). Folgende Gründe dafür konnten identifiziert werden:

Im Diesselbach (92) liegen fast 2/3 des Einzugsgebiets im Karstgebiet. Die Abflüsse dieses Gebiets fliessen unterirdisch ab und werden im Normalfall nicht abflusswirksam. Dieser Umstand wurde bei der Erstellung der Gefahrenkarte berücksichtigt, im Geschiebeabschätzverfahren nicht.

Im Gangbach (86) wird mittels des Abschätzverfahrens bei Murgangtransport eine erhebliche Geschiebemenge aus dem Hauptgerinne mobilisiert. Tatsächlich ist die Gerinnesohle in diesen Gerinneabschnitten jedoch mit sehr groben Blöcken stabilisiert. Dieser Umstand wird im Geschiebeabschätzverfahren nicht berücksichtigt, weshalb es zu einer starken Überschätzung kommt.

Im Mittellauf des Lammbachs (89) liegt sowohl im Gerinne als auch im Hang quasi ein unerschöpfliches Lockermaterialangebot bereit. In der Abschätzung zur Gefahrenkarte wird von einer Mobilisierung sehr grosser Volumina ausgegangen. Diese können im Geschiebeabschätzverfahren bei der Simulation nicht mobilisiert werden, dafür scheint der Einflussfaktor Einzugsgebietsfläche oberhalb A_{EG} zu klein zu sein. Der Grund liegt darin, dass im Geschiebeabschätzverfahren trotz Berücksichtigung des individuellen Charakters jedes Wildbacheinzugsgebiets trotzdem Generalisierungen gemacht werden müssen. Damit nicht allzu pessimistische Abschätzungen erfolgen, wurden deshalb Limiten und Obergrenzen von Erosionsleistungen (u.a. in Abhängigkeit vom Abflussangebot, resp. von der Einzugsgebietsfläche) geschaffen, welche im Fall des Lammbachs im Vergleich zur Abschätzung in der Gefahrenkarte zu optimistisch sind.

11.2.2 Vergleich mit unbekanntem Szenarien

Ein Vergleich zwischen den Geschiebeabschätzungen aus den Gefahrenkarten, bei denen die Szenarien nicht bekannt sind (schwarze Dreiecke und Quadrate in Abb. 11-3) mit den Abschätzungen aus dem Geschiebeabschätzverfahren ist möglich. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass unter Umständen nicht von den genau gleichen Szenarien ausgegangen wurde.

Vergleicht man die Grössenordnungen der Geschiebeabschätzungen, kann gesagt werden, dass die Abschätzungen der Geschiebefrachten mittels dem entwickelten Geschiebeabschätzverfahren im Schützengraben (84), Spissbach (86), Bitzighoferbach (95), Gryfenbach (85), Büetschligraben (88), Eybach (87), Steinibach Hergiswil (91), Steinibach Flühli (101) und Sigetsbach (94) alle in der Bandbreite der Abschätzungen der 100 und 300 jährlichen Geschiebeabschätzungen anlässlich der Gefahrenkartierung liegen. Es kann zudem die Tendenz beobachtet werden, dass das optimistische Szenario SzO eher der 100 jährlichen, das pessimistische Szenario SzP eher der 300 jährlichen Abschätzung entspricht.

Diskrepanzen ergeben sich neben den bereits in Kap. 11.2.1 besprochenen Bächen Diesselbach (92) und Gangbach (98) insbesondere im Wärgistalbach (81) und Eistlenbach (83).

Im Wärgistalbach (81) ist insbesondere das Szenario Murgang SzP im Vergleich zu den Abschätzungen aus der Gefahrenkarte sehr hoch. Ein Grund für die starke Überschätzung könnte die grosse Einzugsgebietsfläche von 13.4 km² sein, welche ausserhalb des vorgesehenen Anwendungsbereichs des Geschiebeabschätzverfahrens liegt.

Im Eistlenbach (83) wird die Geschiebefracht mit dem Abschätzverfahren deutlich unterschätzt. Der Grund dafür liegt im Lockermaterialangebot. Die Runsensysteme im Eistlenbach sind momentan stark aufgefüllt. Im Geschiebeabschätzverfahren sind alle diese Seitengerinne als „limitiertes Lockermaterial“ klassiert, was im Fall des Eistlenbachs eher zu einer Unterschätzung führt. Zudem geht das Abschätzverfahren im untersten relativ flachen Gerinneabschnitt bereits von grösseren Umlagerungsprozessen aus.

11.2.3 Vergleich mit unbekanntem Szenarien und unbekanntem Jährlichkeiten

Zu den Bächen Leimbach (80) und Rufigraben (82) liegen in den Technischen Berichten keine expliziten Angaben zu den Jährlichkeiten und Szenarien vor. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass es sich um 100 jährliche Ereignisse handelt. Während beim Leimbach die Abschätzungen mittels Abschätzverfahren im Bereich derjenigen der Gefahrenkarte liegen, liegen sie im Rufigraben sehr verstreut um die Abschätzung der Gefahrenkarte. Insbesondere das pessimistische Szenario SzP ist sehr hoch. Der Grund ist der Negativfaktor „Ausräumung auf Stauhorizont“ AS, der im oberen Teil des Einzugsgebiets angenommen wurde.

11.2.4 Steinibach, Flühli, LU

In Kap. 2.5.6 wurden verschiedene Geschiebeabschätzverfahren verglichen und auf eine Arbeit von Zimmermann und Lehmann (1999) hingewiesen, in welcher die meisten Abschätzverfahren für einen Vergleich am Steinibach, Flühli LU (101 im Anhang A) angewandt wurden (vgl. Abb. 2-7). Um das in vorliegender Arbeit entwickelte Geschiebeabschätzverfahren ebenfalls diesem Test zu unterziehen, wurde es zusätzlich am Steinibach (LU) (101) angewendet. Zimmermann

und Lehmann (1999) schätzen die 100 jährliche Geschiebefracht im Steinibach, Flüfli LU auf 15'000 bis 20'000 m³. Die Abschätzverfahren, welche getestet wurden, erreichen Frachten zwischen 2'500 m³ und 85'000 m³ (vgl. Kap. 2.5.6.1 und Abb. 2-7). Bei der Methode Lehmann (1993) und Geo7 wurden sowohl ein Szenario mit Murgangtransport als auch eines mit Geschiebetrieb berechnet, weshalb im Diagramm in Abb. 11-4 zwei Säulen dargestellt sind. Bei der Anwendung des hier entwickelten Geschiebeabschätzverfahrens im Steinibach wurden mit der Schreibtisch-basierten Vorgehensweise drei verschiedene Szenarien berechnet. Im optimistischen Szenario SzO wurde von reinem Geschiebetrieb ausgegangen (Abschätzung 12'400 m³), beim Szenario SzX von Murgangtransport durch Sohlenverflüssigung in allen Gerinneabschnitten, in denen dies aufgrund der lokalen Standortfaktoren überhaupt möglich ist und kleineren seitlichen Einträgen durch Runsen (Abschätzung 17'100 m³). Beim pessimistischen Szenario SzP wurde zusätzlich von einer Verklausung im Mittellauf ausgegangen (Abschätzung 37'400 m³) (vgl. Abb. 11-3 und Abb. 11-4). Es zeigt sich, dass in diesem Fall trotz der Schreibtisch-basierten Vorgehensweise die Berechnungen der Szenarien SzO und SzX relativ nahe an den Abschätzungen von Zimmermann und Lehmann (1999) sind (vgl. auch Berechnungen der Szenarien auf der CD und Zusammenfassung in Anhang A).

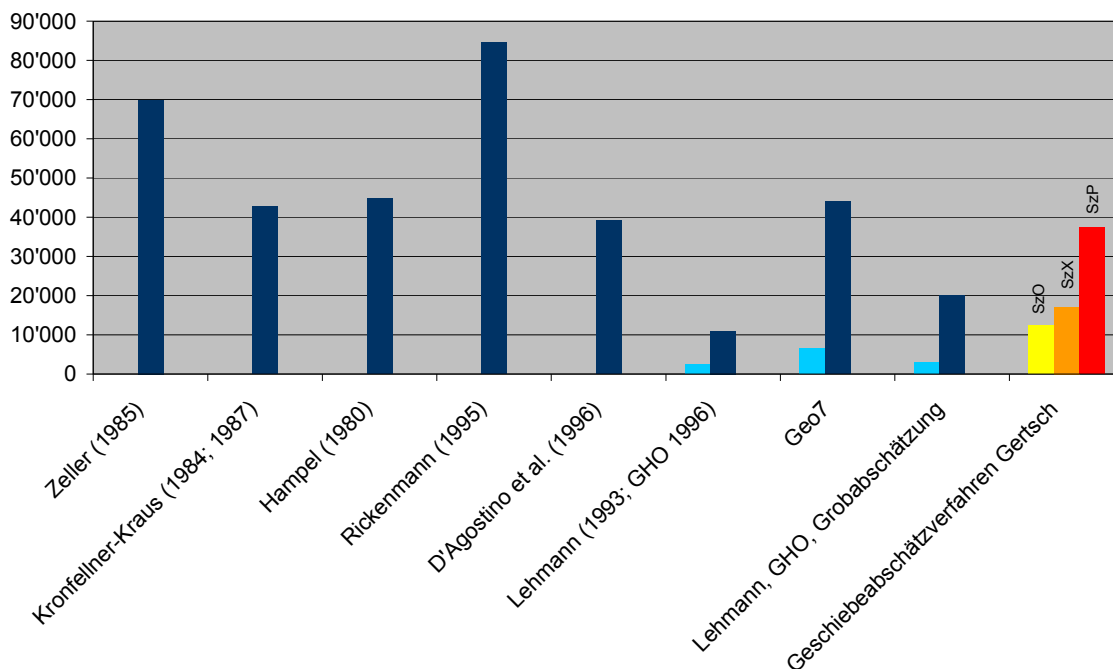


Abb. 11-4: Vergleich der Geschiebeabschätzungen im Steinibach (LU) nach Zimmermann und Lehmann (1999) und den berechneten Szenarien mit dem entwickelten Geschiebeabschätzverfahren

11.3 Sensible Faktoren und Fazit zur Anwendbarkeit

Angesichts der Unsicherheiten, die bei Geschiebeabschätzungen die Normalität darstellen, liefert das neu entwickelte Geschiebeabschätzverfahren gute Resultate in einem angemessenen Zeitraum. Die abgelaufenen Grossereignisse in den Ereignis-Validierungsbächen konnten vom Prozessmechanismus her grösstenteils nachgebildet werden und es ergeben sich bei den Simulationen grösstenteils plausible Geschiebefrachten. Auch bei den Abschätzungs-Validierungsgebieten sind die Abschätzungen der Geschiebefrachten mit dem Geschiebeabschätzverfahren in der Regel plausibel und gut. Das automatisierte Geschiebeabschätzverfahren erlaubt zudem eine effiziente und rasche Beurteilung.

Es zeigte sich, dass die Beurteilung von pessimistischen Szenarien tendenziell für eine Abschätzung von 300 jährlichen oder EHQ Ereignissen zutreffen dürfte, während optimistische und realistische Szenarien eher für die Beurteilung von 100 jährlichen Ereignisse gelten.

In den meisten Fällen, in denen das Geschiebeabschätzverfahren weniger gute Ergebnisse geliefert hat, konnten plausible Erklärungen für dieses Verhalten eruiert werden. Dies lieferte eine gute Basis für die Identifikation von Schwächen des Verfahrens. So können die folgenden sensiblen Faktoren im Geschiebeabschätzverfahren genannt werden:

- **Lockermaterialangebot:** Es hat sich gezeigt, dass der Wahl der Lockermaterialangebots-Klasse eines Gerinneabschnitts grosse Bedeutung zukommt. Es können grosse Unterschiede in der berechneten Geschiebebilanz pro Gerinneabschnitt auftreten, z.B. wenn anstelle von limitiertem Lockermaterial LML die Klasse unlimitiertes Lockermaterial LMUL gewählt wird. Dies hat insbesondere bei der Schreibtisch-basierten Vorgehensweise Konsequenzen. Aufgrund schlechter digitaler Datengrundlagen zum Lockermaterialangebot im Gerinne ist die Aussagegenauigkeit dieser Abschätzungen auf die Gefahrenhinweisstufe reduziert. Bei solchen Abschätzungen ist es durchaus möglich, dass aufgrund der generalisierten digitalen Grundlagen ein Gerinneabschnitt als Lockermaterial unlimitiert klassiert wird, es sich aber um Fels handelt. Im Falle der Feld-ergänzten Vorgehensweise kann diese Unsicherheit reduziert werden, dafür ist jedoch die Einschätzung des/der Anwenders/Anwenderin gefordert. Es liegt in seinem/ihrem Ermessensspielraum, stark ausgeräumte Gerinneabschnitte ohne bedeutende Zwischendepots als „Fels“ F zu klassieren oder Gerinneabschnitte im eigentlich unlimitierten Lockermaterial, aber mit stark abgeplästerte Sohle als „Lockermaterial limitiert“ zu klassieren. Bei einem Szenario eines Versagens von Wildbachsperrern kann das Lockermaterialangebot auch von „limitiert“ zu „unlimitiert“ geändert werden. Solche Verschiebungen der Klassen müssen jedoch in jedem Fall mit Argumenten aus der Geländearbeit begründet werden und dürfen nicht als „Schraube“ für eine Anpassung der Geschiebeabschätzung missbraucht werden.
- **Einzugsgebietsgrösse:** In einigen Validierungsbächen hat sich gezeigt, dass das Geschiebeabschätzverfahren ungeeignet ist für Wildbäche mit Einzugsgebietsgrössen $> 10 \text{ km}^2$. Bei Geschiebetrieb während langanhaltenden Niederschlägen konnte eine deutliche Unterschätzung beobachtet werden, z.B. im Buholzbach (68), Steinibach (69), Dürrbach (70). Im Falle von Murgangprozessen eher eine Überschätzung, z.B. im Minstigerbach (77), Wärgistalbach (81) oder in der Ferrera (66).
- **Mittlere Gerinneneigung von Gerinneabschnitten:** Bei Wildbächen, deren Hauptgerinne im unteren Teil des Einzugsgebiets auf langen Strecken eine Gerinneneigung $< 10\%$ aufweist, versagt die Methodik des Geschiebeabschätzverfahrens, wenn mehrere Gerinneabschnitte abgegrenzt werden müssen (Schützengraben (84)). Es wird somit in jedem neuen Gerinneabschnitt wiederum ein Prozentanteil der gesamten Geschiebefracht abgelagert. Die Ablagerungskubatur steigt mit der Anzahl abgegrenzter Gerinneabschnitte, was vom Prozessverständnis her nicht sinnvoll ist. Die Eichung der Abschätzung von Ablagerungsstrecken für das Geschiebeabschätzverfahren erfolgte im Hinblick auf Zwischenablagerungsstrecken im Einzugsgebiet, welche in einem einzigen Gerinneabschnitt abgegrenzt werden können, und nicht im Hinblick auf lange flache Gerinnestrecken. Aus diesem Grund darf das Geschiebeabschätzverfahren in Wildbächen, die im unteren Einzugsgebiet längere Gerinnestrecken $< 10\%$ haben, nicht angewandt oder nur, wenn diese langen Strecken nur durch einen einzigen Gerinneabschnitt repräsentiert werden.
- **Spezifische Umstände in Wildbächen**, wie z.B. Karstsysteme, welche die Abflussverhältnisse grundlegend verändern können oder aussergewöhnliche andere Prozesse, können im Abschätzverfahren ebenfalls nicht berücksichtigt werden. Hier muss unbedingt eine detaillierte gutachterliche Beurteilung erfolgen.

12 Synthese und Ausblick

Das Vorgehen in dieser Arbeit sowie die dabei gewonnenen neuen Erkenntnisse und Produkte sind in Abb. 12-1 graphisch dargestellt und werden in Kap. 12.1 zuerst überblicksmässig, anschliessend in Kap. 12.2 bis Kap. 12.4 detailliert als Synthese vorgestellt. In Kap. 12.5 folgen Angaben zur Originalität und Spezialität des neu entwickelten Geschiebeabschätzverfahrens im Vergleich zu bestehenden Verfahren, in Kap. 12.6 erfolgt ein Ausblick.

12.1 Überblick

Das Vorgehen in dieser Arbeit richtete sich nach der in Kap. 1.1.2 definierten konkreten Zielsetzung (vgl. rot-graue Kasten in Abb. 12-1), nämlich der

- Verbesserung des Prozessverständnisses der ablaufenden Geschiebeprozesse während Grossereignissen sowie
- der Entwicklung eines Geschiebeabschätzverfahrens für die Praxis und der Validierung dieses Abschätzverfahrens.

Zur Verbesserung des Prozessverständnisses, dem ersten Ziel (linker Teil in Abb. 12-1), dienten detaillierte Analysen von 58 Grossereignissen in 58 Analysebächen im Schweizer Alpenraum. Dabei wurden pro Analysebach homogene Gerinneabschnitte inklusive ihren angrenzenden Hängen gebildet. Die daraus entstandene Stichprobe beinhaltet insgesamt 352 Gerinneabschnitte. Pro Gerinneabschnitt wurden die während dem Grossereignis abgelaufenen Geschiebeprozesse und Geschiebebilanzen in einer Datenbank abgespeichert, ebenso verschiedene Kennwerte zu den naturräumlichen Bedingungen wie Relief, Lockermaterialangebot, Geologie, etc. (vgl. Kap. 3 und Kap. 4).

In einem ersten Analyseschritt wurden anhand der Daten zu den 352 Gerinneabschnitten relevante Einflussfaktoren identifiziert, welche für die Art der Geschiebeprozesse und Menge des verlagerten Geschiebevolumens in den Gerinneabschnitten verantwortlich sind oder sein können. Diese Einflussfaktoren konnten in 3 verschiedene Gruppen eingeteilt werden, welche aus Sicht einer Systembetrachtung 3 verschiedenen Blickwinkeln während einer Wildbachbeurteilung entsprechen (vgl. Kap. 12.2.1 und Kap. 5). Es sind dies die Blickwinkel „lokale Standortfaktoren“ (Symbol Lupe in Abb. 12-1), „Bedingungen oberhalb“ (Symbol Feldstecher) und sog. „Negativfaktoren“ (Symbol Bombe). Die Einflussfaktoren dieser 3 Blickwinkel steuern das Geschehen in einem Gerinneabschnitt in kombinierter Form, wobei in jedem Gerinneabschnitt eine ganz individuelle Einflussfaktor-Kombination wirkt.

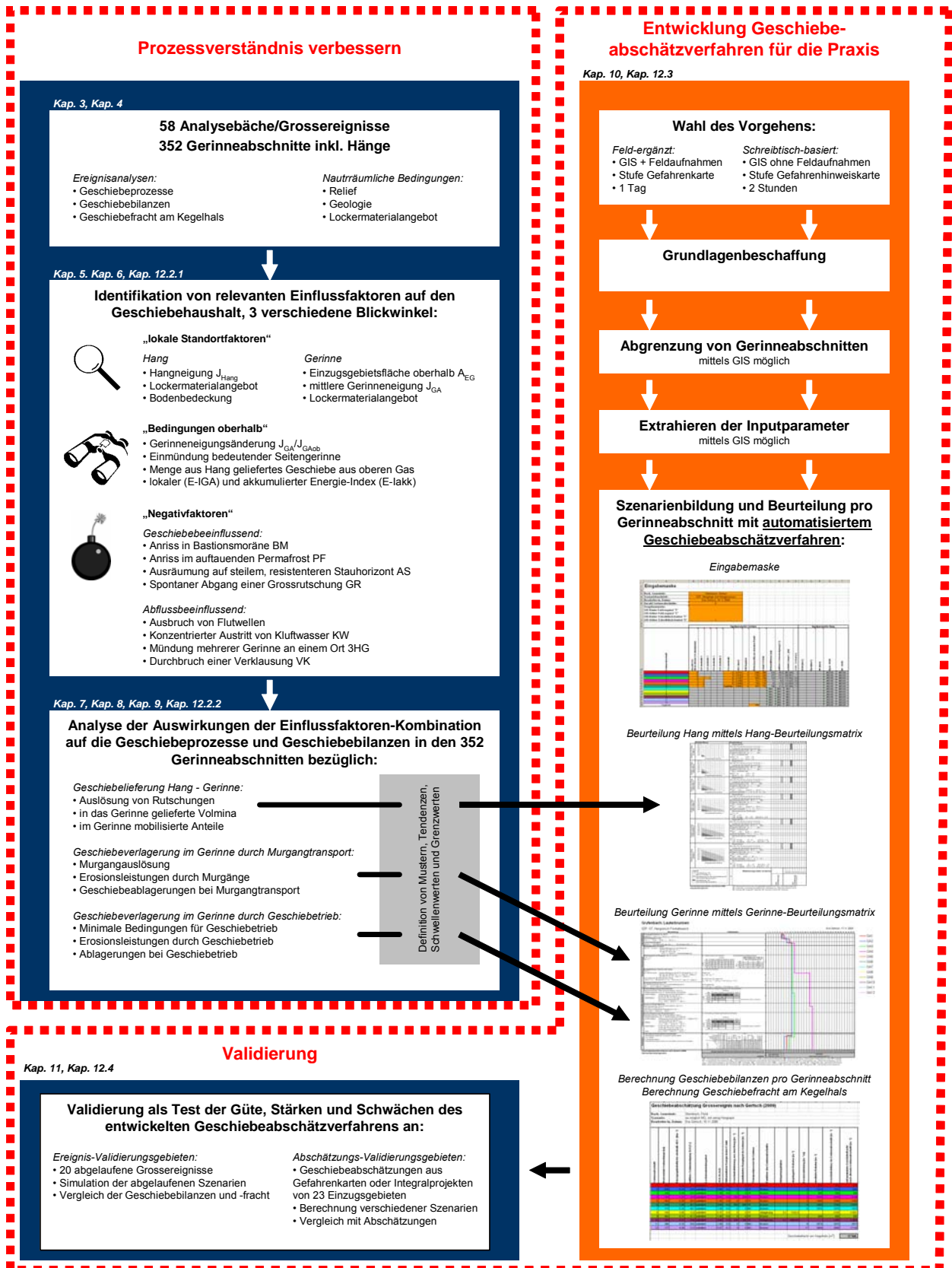


Abb. 12-1: Überblick über Ziele (rot), Vorgehen/Ergebnisse (blau) und Produkte (orange) dieser Arbeit

Ausgehend von diesen definierten Einflussfaktoren wurden in einem zweiten Schritt quantitative und qualitative Datenanalysen zu den Auswirkungen dieser Einflussfaktor-Kombinationen auf die beobachteten Geschiebeprozesse und Geschiebebilanzen in den 352 Gerinneabschnitten

durchgeführt. Dabei konnten neue Erkenntnisse insbesondere zur Geschiebelieferung vom Hang in das Gerinne (Kap. 12.2.2.1 und Kap. 7), sowie zur Geschiebeverlagerung im Gerinne durch Murgangtransport oder Geschiebetrieb gewonnen werden (vgl. Kap. 12.2.2.2 und Kap. 8). Es wurden Muster, Tendenzen, Schwellenwerte und Grenzwerte von Einflussfaktor-Kombinationen abgeleitet und definiert, welche Aufschluss geben, welche Geschiebeprozesse in einem speziellen Gerinneabschnitt bei gegebener Einflussfaktor-Kombination in welchem Ausmass möglich sind.

Diese Schwellen- und Grenzwerte wurden anschliessend für das zweite Ziel weiterverwendet, nämlich der Entwicklung eines empirischen Geschiebeabschätzverfahrens, welches als Produkt für die Praxis aus dieser Arbeit resultiert (vgl. rot-grauer Kasten rechts in Abb. 12-1). Das konkrete Vorgehen und die nötigen Arbeitsschritte werden in Kap. 12.3 zusammenfassend und in Kap. 10 detailliert beschrieben. Die Schnittstelle zwischen den Erkenntnissen zum verbesserten Prozessverständnis und dem Geschiebeabschätzverfahren bilden die definierten Schwellen- und Grenzwerte, welche in die Hang- und Gerinne-Beurteilungsmatrix als Kalibrierdaten implementiert wurden. Diese Beurteilungs-Matrixen bilden das Kernstück des Geschiebeabschätzverfahrens.

Das entwickelte Geschiebeabschätzverfahren wurde einem Test unterzogen und validiert (vgl. unten links in Abb. 12-1). Dabei wurden einerseits Validierungen an 20 weiteren, abgelaufenen Grossereignissen gemacht, andererseits an 23 Geschiebeabschätzungen im Rahmen von Gefahrenbeurteilungen bei der Erstellung von Gefahrenkarten. Die Ergebnisse der Validierung sind ersichtlich in Kap. 12.4 und Kap. 11.

12.2 Erkenntnisse zu einem besseren Prozessverständnis

Zum ersten Ziel, einer Verbesserung des Prozessverständnisses, konnten verschiedene neue Erkenntnisse gewonnen werden, welche sich auf voralpine und alpine Wildbacheinzugsgebiete im Schweizer Alpenraum mit einer Einzugsgebietsfläche von $< 10 \text{ km}^2$ beziehen.

12.2.1 Blickwinkel und relevante Einflussfaktoren auf die Geschiebeprozesse

Um bei Geschiebeabschätzungen in Wildbächen der Komplexität von Wildbachsystemen gerecht zu werden, ist ein Vorgehen angezeigt, das räumliche Zusammenhänge verschiedener Prozesse berücksichtigt. Es müssen deshalb **verschiedene Blickwinkel** berücksichtigt werden (vgl. Kap. 5), um die Geschiebeprozesse in einem homogenen Gerinneabschnitte umfassend beurteilen zu können:

- Ein erster Blickwinkel liegt bei den sog. „**lokalen Standortfaktoren**“ in Hang und Gerinne (vgl. Kap. 5.4.1). Hier werden die Bedingungen vor Ort betrachtet. Dazu gehören im Hangbereich insbesondere die Hangneigung (J_{Hang}), das Lockermaterialangebot und die Bodenbedeckung (vgl. Kap. 6.1.1). Im Gerinne sind es die drei Einflussfaktoren Einzugsgebietsfläche oberhalb des Gerinneabschnitts (A_{EG}), mittlere Gerinneneigung (J_{GA}) sowie das Lockermaterialangebot (vgl. Kap. 6.1.2).
- Ein zweiter Blickwinkel ist der Blick nach oben zu den sog. „**Bedingungen oberhalb**“, indem einerseits die dort vorherrschenden lokalen Standortfaktoren und andererseits die dabei ablaufenden Prozesse beachtet werden (vgl. Kap. 5.4.2). Diese beeinflussen das Geschehen im zu beurteilenden Gerinneabschnitt massgeblich, z.B. durch die Ausgelastetheit

der Transportkapazität und durch den Transportprozess. Als bedeutende Einflussfaktoren sind hierzu das Verhältnis der Gerinneneigung im Gerinneabschnitt zur Gerinneneigung im oberen Gerinneabschnitt (J_{GA}/J_{GAob}), die Einmündung bedeutender Seitengerinne, die Menge aus dem Hang geliefertes Geschiebe in oberen Gerinneabschnitten sowie der akkumulierte Energie-Index zu nennen (vgl. Kap. 6.2). Der akkumulierte Energie-Index $E-I_{akk}$ wurde eigens definiert, um erosionsfördernde Bedingungen aus oberhalb liegenden Gerinneabschnitten zu beschreiben. Er berechnet sich aus einer Aufsummierung der lokalen Energie-Indizes $E-I_{GA}$ in den oberhalb liegenden Gerinneabschnitten. In die Berechnung des lokalen Energie-Index $E-I_{GA}$ fließen pro Gerinneabschnitt die Parameter mittleres Gefälle (J_{GA}), die schiefe Länge (l_s) sowie das Lockermaterialangebot als Mass für Reibungsverluste und Rauigkeit der Gerinnesohle ein.

- sog. „**Negativfaktoren**“, die zu Schwellenprozessen führen können oder solche darstellen, bilden den dritten wichtigen Blickwinkel für eine angemessene Beurteilung des Geschiebehaushalts in einem Gerinneabschnitt (vgl. Kap. 5.4.3). Negativfaktoren sind spezielle Konstellationen oder Prozesse, welche meistens zur Auslösung von Murgängen führen und sowohl in den Gerinneabschnitten, in denen sie ihren Ursprung haben, als auch in unterhalb liegenden Gerinneabschnitten zu extremen Erosionsleistungen führen können. Negativfaktoren wirken als oder führen zu Schwellenprozessen im gesamten Wildbachsystem. Die mobilisierten Geschiebefrachten können dadurch um ein Vielfaches erhöht werden. Je 4 geschiebebeeinflussende und abflussbeeinflussende Negativfaktoren wurden definiert (vgl. Kap. 6.3):
 - **Geschiebebeeinflussende Negativfaktoren** zeichnen sich aus durch eine lokal sehr grosse Geschiebemobilisierung auf einer vorgegebenen Gleitfläche im Hang oder Gerinne. 4 verschiedene geschiebebeeinflussende Negativfaktoren wurden definiert:
 - Anriss in Bastionsmoräne (BM)
 - Anriss im auftauenden Permafrost (PF)
 - Ausräumung auf steilem, resistenteren Stauhorizont im Gerinne (AS)
 - Spontaner Abgang einer Grossrutschung (GR)
 - **Abflussbeeinflussende Negativfaktoren** haben den Effekt, dass es räumlich und/oder zeitlich lokal zu einem stark erhöhten Abflussangebot kommt. 4 verschiedene abflussbeeinflussende Negativfaktoren wurden definiert:
 - Ausbruch von Flutwellen (FW)
 - Konzentrierter Austritt von Kluftwasser (KW)
 - Mündung mehrerer Gerinne an einem Ort (3HG)
 - Durchbruch einer Verkläusung (VK)

12.2.2 Einfluss auf die Geschiebeprozesse

Die eben beschriebenen Einflussfaktoren der verschiedenen Blickwinkel steuern in ihrem gemeinsamen und kombinierten Wirken die Art der Geschiebeprozesse in einzelnen homogenen Gerinneabschnitten von Wildbachsystemen und die dabei mobilisierte und bis zum Kegelhals gelieferte Geschiebefracht bei Grossereignissen.

12.2.2.1 Geschiebelieferung vom Hang in das Gerinne

Bei der Geschiebelieferung aus dem Hang spielen insbesondere Rutschungen die Hauptgeschiebequelle. Die **Auslösung von Rutschungen** ist insbesondere abhängig von der Hangneigung am Auslösungspunkt. Vorzugsweise gleiten Rutschungen ab in einem Bereich zwischen 20° und 48° . Um relevant für das Gerinne zu werden, muss die Distanz der Auslösungspunkte von Rutschungen zum Hochwasser führenden Gerinne im Bereich von < 100 m bis 150 m liegen (vgl. Kap. 7.2.1).

Die **Abschätzung potenzieller Lieferungsvolumina** ist sehr schwierig. Maximal mögliche Lieferungskubaturen sind grundsätzlich abhängig vom Anteil des Hanggebiets mit einer Hangneigung von 20° bis 48° im gesamten Hanggebiet, das maximal 100 m vom Gerinne entfernt ist (= potenzielle Fläche mit möglichen Auslösepunkten für Rutschungen) und vom Anteil des Hanggebiets, in dem fester Fels ansteht (je mehr Fels ansteht, umso geringmächtiger sind in der Regel mögliche Rutschungen im Gebiet) (vgl. Kap. 7.2.2). Eine genaue Abschätzung muss aber grundsätzlich im Gelände erfolgen.

Die **Mobilisierung von Geschiebe aus dem Hang im Gerinne** ist grundsätzlich abhängig von der gelieferten Kubatur aus dem Hang, der Gerinneneigung und von der Einzugsgebietsgrösse oberhalb des Gerinneabschnitts resp. vom Abflussangebot im Gerinne. Vollmobilisierungsfördernde Einflussfaktoren sind Murgänge als vorherrschender Transportprozess im Gerinne, allfällige Negativfaktoren in oberen Gerinneabschnitten, insbesondere abflussbeeinflussende oder erhöhte Werte des akkumulierten Energie-Index $E-I_{akk}$. Geschiebetrieb als Transportprozess sowie Sperren im Gerinneabschnitt führen eher zu Teilmobilisierungen. Bei grossen Lieferungskubaturen pro Gerinneabschnitt sind zudem die Anzahl Inputstellen wichtig. Bei mehreren Inputstellen erfolgt über die gesamte Ereignisdauer sowohl eine zeitliche als auch eine räumliche Dosierung. Dadurch ist im Vergleich zum Abgang derselben Kubatur an einer Stelle zu einem bestimmten Zeitpunkt eher mit einer grösseren Mobilisierung des Hanginputs im Gerinne zu rechnen. Bei letzteren spontanen Rutschungen an einer Stelle spielt zusätzlich der Mündungswinkel in das Gerinne eine wichtige Rolle. Je ähnlicher dieser in Richtung der Gerinneachse verläuft, umso weniger wahrscheinlich sind Verklausungen im Gerinne (vgl. Kap. 7.2.3).

12.2.2.2 Geschiebeverlagerung im Gerinne

Bei der Geschiebeverlagerung im Gerinne wurden die Analysen für die Transportprozesse Murgang und Geschiebetrieb getrennt durchgeführt, da es sich grundsätzlich um verschiedene Prozessmechanismen handelt.

Murgänge

Murgangauslösungen in Gerinneabschnitten sind bei genügend vorhandenem Lockermaterialangebot nur möglich, wenn im Zusammenhang stehende minimale Bedingungen betreffend der mittleren Gerinneneigung des Gerinneabschnitts J_{GA} [%] und der Einzugsgebietsfläche oberhalb A_{EG} [km²] als Mass für das Abflussangebot erfüllt sind. Als Grenzneigung für Murgangauslösungen konnte die Formel $J_{start} = 26 * A_{EG}^{-0.15}$ definiert werden (vgl. Kap. 8.1.1.1). Bei einer Einzugsgebietsfläche oberhalb von > 1 km² und einer Gerinneneigung > 15 % können Murgänge im Fall von Verklausungen im Gerinne auch bei einer Unterschreitung dieses Grenzgefälles entstehen.

Die **Erosionsleistungen durch Murgänge** können im Mittel in einem Gerinneabschnitt zwischen wenigen m³/m bis 250 m³/m liegen. Bei den Datenanalysen konnten Bedingungen formuliert werden, unter welchen verschiedene Ausmasse der Erosionsleistung möglich sind (vgl. Kap. 8.1.1.2):

- **Sehr grosse und extreme Erosionsleistungen** > 70 m³/m sind praktisch nur bei steilen Gerinneverhältnissen > 40% im unlimitierten Lockermaterial und beim Vorhandensein von Negativfaktoren oder sogar Kombinationen verschiedener Negativfaktoren möglich.
- **Grosse Erosionsleistungen** von 20 bis 70 m³/m sind möglich bei Gerinneabschnitten > 10 % Gerinneneigung im unlimitierten Lockermaterialangebot, die direkt oder indirekt durch Negativfaktoren beeinflusst werden. In Ausnahmefällen sind grosse Erosionsleistungen auch möglich ohne das Vorhandensein eines Negativfaktors, nämlich wenn aussergewöhnlich viele und starke erosionsfördernde Faktoren wirken, wie erhöhte Werte des akkumulierten Energie-Index $E-I_{akk}$ oder Einmündungen bedeutender Seitengerinne mit grossen Einzugsgebietsflächen.
- **Mittlere Erosionsleistungen** von 5-20 m³/m sind in Gerinneabschnitten üblich, die eine Gerinneneigung > 10 % haben und entweder durch Negativfaktoren im limitierten Lockermaterial beeinflusst sind oder im Fall ohne Beeinflussung durch Negativfaktoren Einzugsgebietsflächen > 0.5 km² besitzen und erhöhte $E-I_{akk}$ Werte zeigen. Bei kleineren Einzugsgebietsflächen müssen diese Gerinneabschnitte steiler als 30% sein, damit mittlere Erosionsleistungen erreicht werden können.
- **Kleine Erosionsleistungen** im Bereich von 1-5 m³/m sind üblich in Erstabschnitten mit Einzugsgebietsfläche < 1 km² und in Unterlieger-Abschnitten mit limitiertem Lockermaterialangebot.

Geschiebeablagerungen bei Murgangtransport sind umso grösser, je flacher der Gerinneabschnitt ist und je ausgeprägter die Verflachung gegenüber dem oberhalb gelegenen Gerinneabschnitt ist. Praktisch immer zu Ablagerungen kommt es bei einer Gerinneneigung kleiner als 10%. Dabei werden tendenziell grössere Volumina abgelagert, wenn oberhalb ein geschiebebeeinflussender Negativfaktor vorherrscht oder viel Hanginput geliefert wurde. Kleinere Ablagerungen erfolgen tendenziell bei erhöhten $E-I_{akk}$ Werten, wenn ein bedeutendes Seitengerinne in den Gerinneabschnitt einmündet oder oberhalb ein abflussbeeinflussender Negativfaktor ausgelöst wird (vgl. Kap. 8.1.2).

Geschiebetrieb

Damit in einem Gerinneabschnitt überhaupt Lockermaterial durch **Geschiebetrieb** mobilisiert werden kann, müssen **minimale Bedingungen** betreffend der „Einzugsgebietsfläche oberhalb“ A_{EG} [km²] und der Gerinneneigung J_{GA} [%] erfüllt sein. Aus den Analysen konnte dazu die Formel $J_{start} = -4.86 * A_{EG} + 18.6$ als minimales Grenzgefälle für den Start für Gerinneerosion durch Geschiebetrieb definiert werden (vgl. Kap. 8.2.1.1).

Die **durch Geschiebetrieb verursachten Erosionsleistungen** lagen in den untersuchten Grossereignissen zwischen 0 und 11 m³/m. Hauptverantwortlich für die Grösse der Erosionsleistung sind das Lockermaterialangebot, die Gerinneneigung im Gerinneabschnitt und die Einzugsgebietsfläche oberhalb, also die drei lokalen Standortfaktoren (vgl. Kap. 8.2.1.2). Dabei wird umso mehr Geschiebe aus dem Gerinne mobilisiert, je steiler ein Gerinneabschnitt ist und je grösser die Einzugsgebietsfläche ist und umso weniger, je flacher die Verhältnisse sind und je kleiner das Lockermaterial- und Abflussangebot sind. Erosionsfördernde Einflussfaktoren wie die Negativfaktoren „Flutwelle“ oder „Kluftwasser“, vermutlich auch erhöhte $E-I_{akk}$ Werte sind in der Lage, bei gegebenen lokalen Standortfaktoren die Erosionsleistung tendenziell eher zu erhöhen. Erosionshemmende Einflussfaktoren wie ein erhöhter Hanginput in oberhalb liegenden Gerinneabschnitten und im Gerinneabschnitt selber führen tendenziell eher zu einer kleineren Erosionsleistung.

Ablagerungen sind üblich bei Gerinneneigungen unter 10%. Dabei wird umso mehr abgelagert je grösser die Verflachung und je flacher der Gerinneabschnitt ist (vgl. Kap. 8.2.2). Bei Gerinneabschnitten mit einer Gerinneneigung zwischen 10 und 20% sind ebenfalls Ablagerungen auf Verflachungen möglich. Wenn in den Gerinneabschnitten aber erosionsfördernde Einflussfaktoren wie hohe $E-I_{akk}$ Werte oder die beiden Negativfaktoren „Flutwelle“ oder „Kluftwasser“ vorherrschen oder ein bedeutendes Seitengerinne einmündet, sind sie eher unwahrscheinlich.

12.2.2.3 Feststoffaustrag

Als erste grundlegende Erkenntnis in Bezug auf den Feststoffaustrag kann gesagt werden, dass die spezifischen Geschiebefrachten grundsätzlich mit steigender Einzugsgebietsfläche abnehmen. Wichtig für die Höhe der spezifischen Geschiebefracht sind Negativfaktoren und allfällige Zwischenablagerungen. Der Vergleich zwischen den analysierten Grossereignissen, die durch Negativfaktoren beeinflusst waren und denjenigen ohne Negativfaktoren zeigt auf, dass das Niveau der spezifischen Geschiebefrachten beim Vorhandensein von Negativfaktoren sehr viel höher liegen kann als wenn keine Negativfaktoren vorhanden sind (vgl. Kap. 9). So wurden in den Analysebächen mit Hilfe von Negativfaktoren spezifische Geschiebefrachten von bis knapp 180'000 m³/km² erreicht, während das Maximum bei den Grossereignissen ohne Negativfaktoren bei 60'000 m³/km² liegt. Bei Grossereignissen, die durch Negativfaktoren beeinflusst waren und bedeutende Zwischenablagerungen zu verzeichnen hatten, sind die spezifischen Geschiebefrachten hingegen auf sehr tiefem Niveau.

12.3 Entwicklung des Geschiebeabschätzverfahrens

Aus den Analysen der Geschiebeprozesse in den 58 Analysegebieten wurden Schwellenwerte, Muster und Tendenzen abgeleitet, welche für die Entwicklung eines Geschiebeabschätzverfahrens verwendet wurden (vgl. Kap. 10).

Technische Daten

Das **Zielpublikum** des entwickelten Geschiebeabschätzverfahrens sind Expertinnen und Experten, welche bereits ein gutes Prozessverständnis für den Geschiebehaushalt in Wildbachsystemen mitbringen.

Produkte des Geschiebeabschätzverfahrens sind Geschiebebilanzen in Gerinneabschnitten und schliesslich die Geschiebefracht am Kegelhals in Abhängigkeit von verschiedenen, eigens definierten Ereignisszenarien für Grossereignisse mit einer Jährlichkeit ≥ 100 .

Die **Anwendbarkeit** liegt bei steilen alpinen Wildbächen mit einer maximalen Einzugsgebietsfläche $< 10 \text{ km}^2$.

Anwendung

Bevor die Anwendung beginnen kann, erfolgt die **Wahl des Vorgehens**. Es kann gewählt werden zwischen zwei Vorgehensweisen, welche zwei Bearbeitungstiefen entsprechen:

- Bei der **Schreibtisch-basierten Vorgehensweise** werden sämtliche Informationen rein aus digitalen Grundlagendaten im GIS erhoben. Der Zeitaufwand der Anwendung liegt bei rund 2 Stunden, die Aussagegenauigkeit ist aber auf die Gefahrenhinweisstufe beschränkt.
- Bei der **Feld-ergänzten Vorgehensweise** werden aus dem Gelände Aufnahmen zur Wahrscheinlichkeit von Lieferungsprozessen aus dem Hang und dabei abgeschätzte Lieferungskubaturen benötigt, zudem Informationen zum Lockermaterialangebot im Gerinne und zu allfälligen lokalen Ablagerungstrecken. Diese ergänzen die digitalen Grundlagendaten aus dem GIS. Dadurch wird die Aussagegenauigkeit des Geschiebeabschätzverfahrens so verbessert, dass es auf der Stufe Gefahrenkarte eingesetzt werden kann. Der Zeitaufwand für die Durchführung liegt aufgrund der Geländearbeit in diesem Fall bei rund 1 Tag.

Nach der Wahl des Vorgehens werden bei der Anwendung des Geschiebeabschätzverfahrens in einem ersten Schritt die erforderlichen digitalen **Grundlagendaten** DHM, Primärflächendatensatz, Karten und Orthofotos sowie geologische Informationen zusammengetragen und allenfalls mit den Feldaufnahmen ergänzt (vgl. Kap. 10.3). Danach erfolgt die **Abgrenzung** des Einzugsgebiets und von **homogenen Gerinneabschnitten** mit Hilfe eines GIS (vgl. Kap. 10.4). Nach dieser Abgrenzung folgt die **Extraktion der benötigten Inputparameter** für die Eingabemaske des Geschiebeabschätzverfahrens (vgl. Kap. 10.5).

Es folgt gedanklich und vorerst rein qualitativ die **Szenarienbildung** (vgl. Kap. 10.6), wo mögliche Ereignisabläufe durch den Experten oder die Expertin definiert werden.

Anschliessend werden diese mittels des **automatisierten Geschiebeabschätzverfahrens** anhand mehrerer Schritte quantitativ durchgerechnet:

- Dabei werden zuerst die nötigen Werte pro Gerinneabschnitt in die **Eingabemaske** eingegeben (vgl. Kap. 10.7). Es sind dies:
 - Länge des Gerinneabschnitts
 - räumliche Verknüpfung mit den anderen Gerinneabschnitten
 - Einzugsgebietsfläche oberhalb des Gerinneabschnitts
 - Lockermaterialangebot im Gerinneabschnitt
 - Höhe des obersten Punktes im Gerinneabschnitt
 - und allenfalls Werte zur Beschreibung des Hangs bei der Schreibtisch-basierten Vorgehensweise.
- Danach erfolgt **pro Gerinneabschnitt die Beurteilung** der Hang- und Gerinneprozesse in Abhängigkeit vom gewählten Szenario und auf der Basis von je einer entwickelten **Hang- und Gerinne-Beurteilungsmatrix** (vgl. Kap. 10.8 und Kap. 10.9).
- Als **Resultat** dieser Beurteilungen berechnet sich die aus dem Hang im Gerinne mobilisierte Geschiebekubatur sowie die im Gerinne mobilisierte oder abgelagerte Kubatur, also die **Geschiebebilanz pro Gerinneabschnitt**. Durch eine Aufsummierung dieser Geschiebebilanzen der verschiedenen Gerinneabschnitte kann die gesamte **Geschiebefracht am Kegelhals** beim gegebenen Szenario festgelegt werden.

Diese Beurteilung liegt in Form eines **automatisierten Verfahrens in Excel** vor, in dem ein Grossteil der Arbeitsschritte automatisiert wurde, was eine rasche Durchführung erlaubt. Als Ergebnis dieses automatisierten Verfahrens liegt neben einer Tabelle mit den wichtigen Kennzahlen pro Gerinneabschnitt auch je eine grafische Darstellung der Beurteilungen im Hang und im Gerinne vor.

12.4 Validierung und Sensitivitätsanalyse des Geschiebeabschätzverfahrens

Das entwickelte Geschiebeabschätzverfahren wurde an 20 unabhängigen Grossereignissen (Ereignis-Validierungsgebiete) und 23 Geschiebeabschätzungen aus der Praxis im Rahmen von Gefahrenkartierungen und Integralprojekten (Abschätzungs-Validierungsgebieten) getestet (vgl. Kap. 11). Die Ergebnisse dieser Validierung haben gezeigt, dass das Geschiebeabschätzverfahren grundsätzlich sehr gute Ergebnisse liefert und die Abweichungen in der Regel in einem akzeptierbaren Rahmen liegen. Sensible Eingabeparameter wurden identifiziert, allfällige Schwächen aufgezeigt und in Form von Einschränkungen zur Anwendbarkeit kritisch angesprochen und offen dargelegt.

12.5 Spezialität des Geschiebeabschätzverfahrens

Im Vergleich zu bestehenden Abschätzverfahren sind die folgenden Spezialitäten des in dieser Arbeit entwickelten Geschiebeabschätzverfahrens zu nennen:

- Das hier vorgestellte Geschiebeabschätzverfahren wurde an einer sehr grossen Anzahl, an 58 real in der Natur abgelaufenen Grossereignissen kalibriert und an einer ebenfalls grossen Anzahl weiterer Ereignisse (20) und Abschätzungen (23) validiert. Die hier präsentierten Ergebnisse wurden somit wissenschaftlich fundiert erhoben und hergeleitet. Bisherige Abschätzverfahren mit einer ähnlichen Aussagegenauigkeit auf Stufe Gefahrenkarte wurden entweder nur an einer sehr viel kleineren Anzahl Ereignissen kalibriert und nicht validiert (vgl. Kap. 2.5.6)
- Der systembasierte Ansatz beim Geschiebeabschätzverfahren mit dem sowohl räumlich als auch funktional vernetzten Einbezug der relevanten Einflussfaktor-Kombinationen ist neu im Vergleich zu bestehenden Abschätzverfahren. Durch das vernetzte und in Zusammenhängen denkende Vorgehen kann der Komplexität von Wildbachsystemen und der Individualität von einzelnen Gerinneabschnitten Rechnung getragen werden.
- Das hier vorgestellte Geschiebeabschätzverfahren ist sehr stark prozessorientiert. Dabei konnten dank der grossen Anzahl analysierter Grossereignisse neue Prozessmechanismen wie beispielsweise die Negativfaktoren oder der akkumulierte Energie-Index definiert und einbezogen werden. Diese üben massgeblichen Einfluss auf den Geschiebehaushalt in einzelnen Gerinneabschnitten aus.
- Die benötigte Zeit zur Anwendung des vorgestellten Geschiebeabschätzverfahrens ist angepasst auf die heutige Realität im schweizerischen marktwirtschaftlich organisierten System, in dem private Büros unter Konkurrenz Gefahrenbeurteilungen erstellen. Andere Geschiebeabschätzverfahren müssen abgekürzt oder vereinfacht werden, um sie im zur Verfügung stehenden Zeitbudget anwenden zu können, was auf Kosten der Qualität und Aussagegenauigkeit geht.
- Die Tatsache, dass mittels des Geschiebeabschätzverfahrens verschiedene Ereignisszenarien durchgerechnet werden können, entspricht dem heutigen Standard beim Vorgehen während einer Gefahrenbeurteilung in einem Wildbach.
- Je nach Fragestellung und dadurch benötigter Aussagegenauigkeit, kann die Bearbeitungstiefe des Abschätzverfahrens angepasst werden. Im Fall einer kleinen Bearbeitungstiefe erfolgt die Anwendung mittels der Schreibtisch-basierten Vorgehensweise, bei einer grossen Bearbeitungstiefe mittels der Feld-ergänzten Vorgehensweise. Dadurch kann das Vorgehen optimal an die von der Fragestellung und vom Kostendach abhängige zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit angepasst werden. Dies ist ein wesentlicher Vorteil für die Anwendung in der Praxis.
- Die Anwendung des hier vorgestellten Geschiebeabschätzverfahrens kann auf verschiedenen Niveaus betreffend Software-Verfügbarkeit durchgeführt werden. So können die Abfragen für die benötigten Inputparameter sowohl mittels GIS vektorbasiert, GIS rasterbasiert als auch im Prinzip ohne ein GIS erfolgen. Das automatisierte Geschiebeabschätzverfahren wird als einfache Excel-Arbeitstabelle zur Verfügung gestellt und ist somit für jedermann/-frau durchführbar, sofern er/sie fachlich gesehen Experte/in ist und genügend Erfahrung im Prozessverständnis des Geschiebehaushalts in Wildbachsystemen besitzt.

12.6 Ausblick



Abb. 12-2: Spuren eines Murgangs im Tanzhubelbächli (7)

Bezüglich dem in dieser Arbeit neu entwickelten Geschiebeabschätzverfahren ergeben sich verschiedene Ausbaumöglichkeiten:

- **Vergrossern der Stichprobe:** Das hier vorgestellte Geschiebeabschätzverfahren wurde an 58 Grossereignissen entwickelt, sowie an 20 Grossereignissen und 23 Geschiebeabschätzungen getestet und validiert. Dadurch ist es geprägt durch diese Stichprobe an Grossereignissen. Das Geschiebeabschätzverfahren steht jedoch inhaltlich nicht abschliessend und definitiv da. Es ist als Erstversion zu verstehen, die nun in der Praxis sowohl vom arbeitstechnischen Ablauf als auch von der fachlichen Seite her geprüft werden muss. Nur so kann es laufend ergänzt, optimiert und auf lange Frist verbessert werden. Für Ergänzungen gilt es besonders, die Augen für allfällige zusätzliche Negativfaktoren offen zu halten. Denkbar wäre z. B., dass ein Kollaps einer Wildbachsperre auch ein Negativfaktor darstellen könnte. Da dieses Phänomen in der Stichprobe dieser Arbeit nicht vorgekommen ist, wurde es bisher nicht berücksichtigt. Von der fachlichen Seite werden weitere zukünftig ablaufende Grossereignisse Aufschluss geben, ob die Kalibrierung des Geschiebeabschätzverfahrens in jedem Fall stimmt.
- **Übertragung auf andere Gebiete:** Das Geschiebeabschätzverfahren wurde rein aus Grossereignissen im Schweizer Alpenraum entwickelt und getestet. Eine Anwendung in den angrenzenden Alpenländern ist wahrscheinlich grundsätzlich möglich, da die klimati-

schen und geologischen Bedingungen ähnlich sind. Um diesbezüglich ein abschliessendes Urteil machen zu können, müssten konkrete Tests und Anwendungen erfolgen. Anwendungen in anderen Gebirgsregionen wären ebenfalls prinzipiell denkbar, jedoch müssten hier in jedem Fall zuerst weitere Untersuchungen unternommen werden.

- **Abschätzungen von häufigeren Ereignissen:** Es wäre wünschenswert, das Geschiebeabschätzverfahren dahin gehend zu ergänzen, dass nicht nur Abschätzungen von Geschiebefrachten von Grossereignissen ≥ 100 jährlich möglich wären, sondern auch häufigere Ereignisse beurteilt werden könnten. Dieses Ziel wäre jedoch mit sehr grossem Aufwand verbunden. Es müssten zahlreiche, zusätzliche, häufigere und kleinere Ereignisse untersucht werden. Der Nachteil dieser Ereignisse ist, dass sie kaum Aufsehen erregen, da sie glücklicherweise meistens kaum Schäden verursachen. Dadurch existieren aber zu kleineren Ereignissen einerseits kaum detaillierte Dokumentationen aus der Vergangenheit. Andererseits ist die Erstellung solcher Dokumentationen auch sehr schwierig, da die Spuren solcher Ereignisse im Gelände sehr viel weniger deutlich sind und die Unsicherheiten bei den Abschätzungen der verlagerten Volumen sehr gross sind.
- **Stärkerer Einbezug der Hydrologie:** Beim Geschiebeabschätzverfahren wurde der Hydrologie durch die starke Vereinfachung und Reduktion auf die Einzugsgebietsfläche oberhalb der Gerinneabschnitte relativ wenig Rechnung getragen. Hier könnten weitere Anstrengungen unternommen und dadurch die Verbindung zur Hydrologie verstärkt werden. Denkbar wäre eine Ergänzung mit weiteren Erkenntnissen zu Hochwasserabschätzungen in Wildbachsystemen, so zum Beispiel den Einbezug von regionalen Kennwerten zu kurzen und langanhaltenden Starkniederschlägen, der Abflussbildung und den daraus folgenden Abflussganglinien und Abflussspitzen. Arbeiten hierzu laufen momentan beispielsweise in der Gruppe für Hydrologie des Geographischen Instituts der Universität Bern (Dobmann 2009 (in Arbeit)) und könnten später mit dieser Arbeit verbunden werden.

Bezüglich dem allgemeinen Kenntnisstand im Themenbereich „Geschiebehalt in Wildbachsystemen“, erfordern die bestehenden Unsicherheiten immer noch grossen Handlungsbedarf. Dieser sollte auf verschiedenen Schienen vorangetrieben werden:

- **Aus abgelaufenen Ereignissen weiterhin Lehren ziehen:** Die Anstrengungen seitens des Bundes, abgelaufene Naturgefahren-Ereignisse standardmässig und einheitlich zu dokumentieren, müssen unbedingt weitergeführt werden. Dies geschieht momentan einerseits mittels des Neuen Finanzausgleichs NFA, durch den die Kantone für die Führung eines detaillierten Ereigniskatasters mit Mehrleistungen des Bundes an Wasserbau-Projekte rechnen können. Andererseits wird eine Erneuerung und Optimierung des aktuellen Ereigniskataster-Systems StorMe des Bundes angestrebt. Diese Entwicklungen gehen in eine gute Richtung. Es gilt jedoch anzumerken, dass der beste Ereigniskataster nichts nützt, wenn die abgelaufenen Ereignisse vor Ort im Gelände nur minimal dokumentiert und auf den Aufnahmeformularen unvollständig ausgefüllt worden sind. Auch hier sollten minimale Qualitätsstandards festgelegt werden. Für die Dokumentation von abgelaufenen Ereignissen müssen vor Ort im Gelände unbedingt und ausnahmslos gut ausgebildete Fachleute eingesetzt werden. Nur durch ihre Erfahrung, ihr gutes Prozessverständnis und der Fähigkeit, abgelaufene Ereignisse durch Quervergleiche mit anderen Orten und Ereignissen einordnen und beschreiben zu können, kann aus diesen an sich äusserst wertvollen Daten später ein wirksamer Nutzen gezogen werden. Detaillierte und breit gefächerte Ereignisanalysen, wie sie z.B. nach dem August Hochwasser 2005 erfolgten (Bezzola und Hegg 2007 und

2008), sind zusätzlich sehr wertvolle Arbeiten, welche wichtige neue Erkenntnisse bringen. Dafür müssen aber auch in Zukunft die notwendigen Mittel zur Verfügung gestellt werden.

- **Forschen:** Grundlagenforschung zur Verbesserung des Prozessverständnisses bringt zusätzliche neue Erkenntnisse. Gerade beim Transportprozess Murgang, wo noch viele Fragen offen sind, bringen Untersuchungen in Testgebieten wie beispielsweise dem Illgraben (WSL), wichtige neue Resultate. Auch verbesserte technische Möglichkeiten zur Messung und Aufzeichnung von Geschiebetransport während Ereignissen, wie sie etwa im Testgebiet Spissibach Leissigen des Geographischen Instituts der Universität Bern entwickelt werden, können hierzu wichtige neue Erkenntnisse liefern. Zu nennen sind im weiteren Modell- und Laborversuche zum Geschiebetransport wie sie beispielsweise an der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH Zürich oder an verschiedenen Fachhochschulen durchgeführt werden. Im Zusammenhang mit Grundlagenforschung bildet der in dieser Arbeit aufgebaute Datensatz sicherlich eine wertvolle Datengrundlage, die zukünftig genutzt werden kann. Die erhobenen Daten bieten zum Beispiel die Möglichkeit zur Eichung von Modellen oder zur Bearbeitung ergänzender oder vertiefenden Fragestellungen im Themenbereich Geschiebehaushalt in Wildbächen.
- **Messen von Geschiebefrachten in Wildbächen:** Das GHO-Geschiebemessnetz ist das einzige Messnetz in der Schweiz, in dem systematisch Daten zu Geschiebefrachten in Wildbächen des gesamten Schweizer Alpenraumes zusammengetragen werden (BWG 2005). Es besteht seit 1987 und zu rund 100 Wildbächen werden von den kantonalen Fachstellen jährlich Meldungen zu geleerten Kubaturen aus Geschiebesammlern an das Bundesamt für Umwelt (Abt. Hydrologie) gemacht, wo diese in der SOLID-Datenbank abgelegt werden (Gertsch und Grasso 2004). Die Daten dieses Messnetzes werden umso wertvoller für eine Verbesserung des Prozessverständnisses, je länger das Messnetz unterhalten und fortgesetzt wird. Beobachtungen des Geschiebehaushalts in einzelnen Wildbächen über eine sehr lange Zeitperiode bringen neben bereits oben beschriebenen neuen Erkenntnissen zu Prozessmechanismen vor allem auch wertvolle Informationen zum langfristigen Verhalten des Geschiebehaushalts in verschiedensten Wildbachsystemen. Durch dieses Monitoring können neue Erkenntnisse insbesondere zu Jährlichkeiten von Geschiebefrachten in verschiedensten Wildbachsystemen gewonnen werden.

Es gibt noch viel zu tun im Themenbereich „Geschiebehaushalt in Wildbachsystemen“. Sicher ist, dass die während Grossereignissen ablaufenden Geschiebeprozesse nie in ihrer ganzen Gesamtheit und Komplexität verstanden und vorhergesagt werden können, da immer auch unberechenbare und chaotische Komponenten mitspielen. So kann ein Ereignis zum Beispiel aufgrund eines einzigen mitgeschwemmten Baumstamms, der sich verkeilt oder eben nicht, einen komplett anderen Verlauf nehmen (vgl. Abb. 12-3). Diese Unberechenbarkeit, diese „Wildheit“ von alpinen Gebirgsbächen ist es denn auch, welche einerseits eine grosse Faszination ausübt und andererseits eine spannende Herausforderung darstellt, die es möglichst pragmatisch und eventuell manchmal auch unkonventionell zu lösen gilt.



Abb. 12-3: Ein einziger, zufällig verkeilter Baumstamm provozierte eine grössere Ablagerung im Schnellengraben in der Wasserloui/Schatzlibach (Sarnen) während dem Ereignis im August 2005 (Foto: belop gmbh)

13 Literaturverzeichnis

Die Quellenangaben zu den einzelnen in dieser Arbeit untersuchten Wildbacheinzugsgebieten befinden sich auf den Factsheets aller einzelnen Bäche in Anhang A.

13.1 Öffentlich zugängliche Dokumente

Aulitzky, H. 1973: Vorläufige Wildbach-Gefährlichkeits-Klassifikation für Schwemmkegel. 100 Jahre Hochschule für Bodenkultur, Bd. IV, Teil 2:114-117, Ver. Z. Förd. d. forstl. Forschung in Österreich, Wien.

BABS, 2003: Katastrophen und Notlagen in der Schweiz. Eine Risikobeurteilung aus der Sicht des Bevölkerungsschutzes, Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), Bern.

Bezzola, G.R., Hegg, Ch. (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Umwelt-Wissen Nr. 0707, Bern und Birmensdorf.

Bezzola, G.R., Hegg, Ch. (Ed.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Umwelt-Wissen Nr. 0825, Bern und Birmensdorf.

BUWAL, BWW, BRP 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bern und Biel.

BUWAL 1998: Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko. Arbeitspapier. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Eidg. Forstdirektion, Bern.

BWG 2001: Hochwasserschutz an Fliessgewässern. Wegleitung des BWG. Bundesamt für Wasser und Geologie BWG, Bern.

BWG 2002: Hochwasser 2000, Ereignisanalyse Fallbeispiele, Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 2. Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bern.

BWW 1990: Ursachenanalyse Unwetterereignisse 1987, A6 „Murgänge“, Schlussbericht. Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bern.

BWW, GIUB 1990: Ursachenanalyse Unwetterereignisse 1987, A5 „Gesindebelieferung durch Wildbäche“, Schlussbericht. Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Geographisches Institut der Universität Bern (GIUB), Bern.

BWW und BUWAL, 1995: Symbolbalken zur Kartierung der Phänomene. Ausgabe 1995. Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW) und Bundesamt für Umwelt (BUWAL), Bern.

BWW 1998: Ereignisdokumentation Sachseln, Unwetter vom 15. August 1997. Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW) in Zusammenarbeit mit Tiefbauamt des Kantons Obwalden und Oberforstamt des Kantons Obwalden, Studienbericht Nr. 8, Bern.

- Costa, J.E. 1984: Physical Geomorphology of Debris Flows. Springer Verlag, Berlin.
- D'Agostino, V., Cerato, M., Coali, R. 1996: Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del trentino orientale. Interpraevent 1996, Tagungspublikation.
- DIN 19663 1985: Wildbachverbauung: Begriffe, Planung und Bau. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im Deutschen Institut für Normung (DIN), Berlin.
- EAFV 1971: Wildbachverhältnisse im Urner Reusstal im Bereiche der Nationalstrasse N2. Expertenkommission für die Sicherheit der Nationalstrasse N 2 im Kanton Uri. Beratungsstelle für Wildbach- und Hangverbau, Eidg. Anstalt für das Forstliche Versuchswesen EAFV, Birmensdorf.
- Frei C., Germann U., Fukutome S., Liniger, M. 2008: Möglichkeiten und Grenzen der Niederschlagsanalysen zum Hochwasser 2005. In Bezzola, G.R., und Hegg, Ch. (Ed.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Umwelt-Wissen Nr. 0825, Bern und Birmensdorf.
- Frick, E., Hiller, R., Kienholz, H., Romang, H. 2007: SEDEX (SEDiments and EXperts) Eine praxistaugliche Methodik zur Beurteilung der Feststofflieferung in Wildbächen. Entwurf September 2007, Bern.
- Gamma, P. 2000: dfwalk – Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. Geographica Bernensia, G66, Bern.
- Geo7, 1997: Zur Abschätzung von Ereignisfrachten im Rotbach und Steinibach (LU). Gutachten für das Tiefbauamt des Kantons Luzern.
- Gertsch, E., Grasso, A. 2004: Das GHO-Geschiebemessnetz – ein langfristiger Gewinn für die Geschiebeabschätzung. In FAN-Agenda 1/04. Fachleute Naturgefahren Schweiz FAN.
- Gertsch, E., Kienholz, A. 2008: Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen. In: Interpraevent 2008 – Conference Proceedings, Vol. 1, Klagenfurt.
- GHO 1992: Verzeichnis hydrologischer Fachausdrücke mit Begriffserklärung. Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie GHO, Bern.
- GHO 1999: Feststoffverlagerung in steilen Fliessgewässern, Erhebung und Dokumentation nach Unwetterereignissen. Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie (GHO), Mitteilung Nr. 5, Bern.
- Greenway, D. R. 1987: Vegetation and slope stability. In Anderson, M. G., Richards, K. S. (Eds.), Slope Stability: geotechnical engineering and geomorphology, Wiley, Chichester.
- Haerberli, W., Rickenmann, D., Zimmermann, M., Rösli, U., 1991: Murgänge. In: Ursachenanalyse der Hochwasser 1987, Ergebnisse der Untersuchungen. Mitt. des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Nr.4, Mitt der Landeshydrologie und -geologie, Nr. 14, EDMZ Form.-Nr.804.304:77-88, Bern.
- Hamberger, M. 2007: Rutschungserkennung mit Klassifikationssystemen am Beispiel Sachseln/Schweiz. Dissertation am Institut für Geologie und Mineralogie der Universität Erlangen-Nürnberg.

- Hampel, R. 1980: Die Murenfracht von Katastrophenhochwässern. Wildbach- und Lawinenverbau, Dezember 1980.
- Hegg, Ch., Rickenmann, D. 2000: Geschiebetransport in Wildbächen – Vergleich zwischen Feldmessungen und einer Laborformel. In: Tagungspublikation Interpraevent 2000, Band 3: 117-128.
- Heinimann, H.R., Hollenstein, K., Kienholz, H., Krummenacher, B., Mani, P. 1998: Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren. Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- Hilker, N., Hegg, C., Zappa, M. 2008: Unwetterschäden in der Schweiz 1972 – 2007 – mit besonderer Betrachtung des August-Hochwassers 2005. In: Interpraevent 2008 – Conference Proceedings, Vol. 1, Klagenfurt.
- Kienholz, H. 1995: Gefahrenbeurteilung und –bewertung – auf dem Weg zu einem Gesamtkonzept. Schweiz. Z. Forstw, Jg. 146(9), 701-725.
- Kienholz, H., Keller, H.M., Ammann, W., Weingartner, R., Germann, P.F., Hegg, Ch., Mani, P., Rickenmann, D. 1998: Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes „Klimaveränderung und Naturkatastrophen“, NFP 31. vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH, Zürich.
- Kienholz, H., Gosteli, H., Fässler, M., Aeberhard S. 2008: Fachtechnische Analyse der Gefahrengrundlagen. In: Bezzola, G.R., Hegg, Ch. (Ed.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL). Umwelt-Wissen Nr. 0825, Bern und Birmensdorf.
- Kronfellner-Kraus, G. 1982: Über den Geschiebe- und Feststofftransport in Wildbächen. Österreichische Wasserwirtschaft, 24, 1/2, 12-21.
- Kronfellner-Kraus, G. 1987: Zur Anwendung der Schätzformel für extreme Wildbach-Feststofffrachten im Süden und Osten Österreichs. Wildbach- und Lawinenverbau, Heft 106, 51. Jahrgang.
- Lehmann, Ch. 1993: Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen – Grundlagen und Anleitung. Geographica Bernensia G42. Bern.
- Liener, S. 2000: Zur Feststofflieferung in Wildbächen. Geographica Bernensia G64, Bern.
- Loat, R., Meier, E. 2003: Wörterbuch Hochwasserschutz. Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.). Haupt, Bern.
- MeteoSchweiz 2006: Starkniederschlagsereignis August 2005. Arbeitsbericht MeteoSchweiz, Zürich.
- Meyer-Peter, E., Müller, R. 1948: Formulas for Bedload Transport. Proc. 2nd Congress IAHR, Stockholm.
- Moser, M. 1997: Zur Prognose von Massenbewegungen. Eclogae geol. Helv. 90.
- Petrascheck, A. 2008: Wieviel Schutz vor Naturgefahren können wir versprechen? In Interpraevent 2008 – Conference Proceedings, Vol. 1, Klagenfurt.

- PLANALP 2006: Dokumentation von Naturereignissen, Feldanleitung. Plattform Naturgefahren der Alpenkonvention (PLANALP), Alpensignale 4, Innsbruck/Bern.
- Rickenmann, D. 1990: Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. Mitt. der Versuchsanst. für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich.
- Rickenmann, D. 1995: Beurteilung von Murgängen. Schweizer Ingenieur und Architekt 48, 1104–1108.
- Rickli, Ch. 2001: Vegetationswirkungen und Rutschungen – Untersuchung zum Einfluss der Vegetation auf oberflächennahe Rutschprozesse anhand der Unwetterereignisse in Sachseln OW am 15. August 1997. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Birmensdorf, Bern.
- Rickli, Ch., Bucher, H. 2003: Oberflächennahe Rutschungen, ausgelöst durch die Unwetter vom 15. – 16.7.2002 im Napfgebiet und vom 31.8.2002 im Gebiet Appenzell – Projektbericht zuhanden des Bundesamts für Wasser und Geologie BWG. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf.
- Röthlisberger, G., Zeller, J., Geiger, H., Bosshard, W. 1976 – 1991: Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebiets. Intensitäten und Häufigkeiten: ausgewertete Periode 1901 – 1970. Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV). 7 Bände. Birmensdorf.
- Salter, R., Crippen, T., Noble, K. 1981: Storm damage assessment of Thames-Te Aroha area following the storm of April 1981: Final Report, Water and Soil Science Center, Auckland.
- Schweizerische Geotechnische Kommission 1967: Geotechnische Karte der Schweiz. Kümmerly & Frey, Bern.
- Selby, M.J. 1993: Hillslope Materials and Processes. Oxford University Press, Oxford.
- Smart, G.M., Jäggi, M.N.R. 1983: Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitt. Nr. 64 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich.
- Spreafico, M., Lehmann, Ch., Naef, O. 1996: Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie GHO, Mitteilung Nr. 4, Bern.
- Spreafico, M., Lehmann, Ch., Jakob, A., Grasso, A. 2005: Feststoffbeobachtung in der Schweiz – Ein Tätigkeitsgebiet der Landeshydrologie. Berichte des BWG, Serie Wasser Nr. 8, Bern.
- Stalder, H. 2006: Naturkatastrophen in den Medien – die Medien in Naturkatastrophen. Beitrag am FAN Forum, 24.2.2006. Fachleute Naturgefahren Schweiz.
- Stiny, J. 1931: Die geologischen Grundlagen der Verbauung der Geschiebeherde in Gewässern. Julius Springer, Wien.
- Takahashi, T. 1978: Mechanical characteristics of debris flows. ASCE, Journal of Hydraulics Engineering, Vol. 104: 1153-1168

- TBA Kt. BE 2006: Lokale lösungsorientierte Ereignisanalyse Glyssibach, Bericht zum Vorprojekt. NDR Consulting Zimmermann, Niederer + Pozzi Umwelt AG im Auftrag des Tiefbauamt des Kantons Bern (TBA Kt. BE), Oberingenieurkreis I, Thun.
- Tognacca, Ch. 1999: Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. ETHZ, Zürich.
- VAW 1991: Murgänge 1987. Dokumentation und Analyse. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der Eidg. Technischen Hochschule Zürich, Bericht Nr. 97.6, Zürich.
- Vester, F. 2002: Die Kunst vernetzt zu denken. dtv, 5. edition, München.
- Wikipedia 2008: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie zum Begriff „System“, <http://de.wikipedia.org/wiki/>, Zugriff 19.9.2008
- Zeller, J. 1985: Feststoffmessung in kleinen Gebirgseinzugsgebieten. Wasser, Energie, Luft, vol. 77, Nr. 7/8.
- Zimmermann, M. 1990: Debris flows 1987 in Switzerland: geomorphological and meteorological aspects. In: International Association of Hydrological Sciences (1990b), S. 387-393.
- Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O., Hunziker, G. 1997: Murgangefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Projektschlussbericht im Rahmen des nationalen Forschungsprogrammes „Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz“ NFP 31. vdf Hochsch.-Verl. an der ETH, Zürich.
- Zimmermann, M., Lehmann, Ch. 1999: Geschiebefracht in Wildbächen: Grundlagen und Schätzverfahren. In wasser, energie, luft 91. Jahrgang, 1999, Heft 7/8, Baden.

13.2 Digitale Grundlagendaten

- Bundesamt für Landestopographie 2005a: Digitales Höhenmodell DHM25/Level1. Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Verträge (DV002234.1, DV002232.1, DV043734), Bern.
- Bundesamt für Landestopographie 2005b: Gewässernetz VECTOR25. Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Verträge (DV002234.1, DV002232.1, DV043734), Bern.
- Bundesamt für Landestopographie 2005c: Primärflächen VECTOR25. Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Verträge (DV002234.1, DV002232.1, DV043734), Bern.
- Bundesamt für Landestopographie 2005d: SwissImage. Bundesamt für Landestopographie (swisstopo), Verträge (DV002234.1, DV002232.1, DV043734), Bern.
- Bundesamt für Statistik 1992/97: Arealstatistik der Schweiz, Datensatz GEOSTAT. Bundesamt für Statistik, Lizenzen Nr. Z158000126, Z158000127, Bern.
- Bundesamt für Statistik 1995: Vereinfachte Geotechnische Karte der Schweiz, Datensatz GEOSTAT. Bundesamt für Statistik, Lizenzen Nr. Z158000126, Z158000127, Bern.
- Bundesamt für Wasser und Geologie, Bundesamt für Landestopographie, 2005: Georeferenzierte Pixelkarten des Geologischen Atlas der Schweiz 1 : 25'000, Bundesamt für Landestopographie, Bundesamt für Wasser und Geologie, Vertrag GA25PK-GIUB, Bern.

13.3 Nicht publizierte oder auf Anfrage erhältliche Literatur

- Bertschi, W. 2005: Empirische Modelle zur Geschiebefrachtabschätzung. Kalibrierung und Eingrenzung unterschiedlicher Modelle. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.
- Dobmann, J. 2009 (in Arbeit): Hydrologische Beurteilung kleiner Einzugsgebiete in der Schweiz. Ergänzende Praxishilfe zur Hochwasserabschätzung. Dissertation am Geographischen Institut der Universität Bern.
- Fässler, M. 2008: Die Rolle des Gletschervorfeldes bei Wildbachprozessen. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.
- Heim, G. 2005: Schlüsselstellenanalysen im Gerinne. Untersuchungen des Feststoffverlagerungsprozesses in Wildbächen bei Murgangereignissen. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.
- Jetel, M. 2007: Analysen von Ereignisniederschlägen in ausgewählten Wildbacheinzugsgebieten während Grossereignissen. Unveröffentlichte Seminararbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.
- Kienholz, D. 2007: Einordnen von einzelnen Wildbachereignissen in ihre Ereignisgeschichte. Unveröffentlichte Bachelorarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.
- Nitsche, M., 2009 (in Arbeit): Bedload calculation in mountain rivers with state-of-the-art bed-roughness approaches - a test on field event data.
- Schluep, D., Wüthrich, Ch. 2006: Die Erstellung einer Datenbank von repräsentativen Niederschlags-Messstationen für ausgewählte Wildbäche. Unveröffentlichte Seminararbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.
- Sterchi, R. 2007: GIS-Analysen zur Auslösung und Geschiebelieferung durch Hangmuren/Rutschungen während Grossereignissen in Wildbächen. Unveröffentlichte Seminararbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.
- Werlen, S. 2004: Hangmuren – Einflussfaktoren von Lockergesteinsrutschungen. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.
- Zingg, S. 2007: Evaluation des Einsatzbereiches von Laserscan- und weiteren bestehenden digitalen Höhenmodellen für eine GIS-basierte Beurteilung von steilen Wildbacheinzugsgebieten. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Bern.

