FAN Praxiskurs
«Gefahrenbeurteilung gravitative Naturgefahren»

Modul Wildbäche

Wildbäche und steile Gerinne

Autorinnen/Autoren:

Gabi Hunziker, Hunziker Gefahrenmanagement
Tel. 031 755 87 58, gefahrenmanagement@bluewin.ch

Catherine Berger, geo7 AG
Tel. 031 300 44 33, catherine.berger@geo7.ch

Josef Berwert-Lopes, belop gmbh
Tel. 041 661 02 70, berwert@belop.ch

Im Auftrag von

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Der Praxiskurs «Gefahrenbeurteilung gravitative Naturgefahren» der Fachleute Naturgefahren Schweiz (FAN) im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) bietet Berufseinsteigern mit geringer praktischer Erfahrung in der Gefahrenbeurteilung eine Möglichkeit, sich Fachkenntnisse zur Beurteilung von gravitativen Naturgefahrenprozessen anzueignen, entsprechende Fähigkeiten zu trainieren und diese zielgerichtet anzuwenden.

Projektleitung

Eva Gertsch-Gautschi, BAFU
Christoph Graf, FAN (Gesamtprojektleiter)
Nils Hählen, FAN
Wolfgang Ruf, BAFU

Begleitgruppe

Duss Herbert, Tiefbauamt Kanton Uri
Schertenleib Adrian, BAFU
Zimmermann Markus, NDR Consulting GmbH

Kontakt

Fachleute Naturgefahren Schweiz (FAN)
c/o Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL
Gebirgshydrologie und Massenbewegungen
Christoph Graf
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf
+41 44 7392 454
christoph.graf@wsl.ch / praesident@fan-info.ch

Zitiervorschlag

Hunziker Gabi (Modulleitung), Berger Catherine, Berwert-Lopes Josef, 2022: Skript Modul Wildbäche. Praxiskurs Gefahrenbeurteilung gravitative Naturgefahren. Fachleute Naturgefahren Schweiz FAN. V. 1.0, 47 S.

Bezug

Fachleute Naturgefahren Schweiz (FAN)
c/o geo7 AG
Sonja Cosandey
Neufeldstrasse 5-9
3012 Bern
Tel: 031 300 44 33
kontakt@fan-info.ch

PDF Download

www.fan-info.ch > Veranstaltungen > Praxiskurs Gefahrenbeurteilung

© Fachleute Naturgefahren Schweiz (FAN), 2021 Druckdatum 8. April 2022

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 5
2 Übersicht Wildbachgefahren 5
2.1 Typisierung und Abgrenzung 6
2.2 Disposition zur Auslösung von Wildbachprozessen 7
2.3 Abflussbildung und Geschiebemobilisierung 7
2.4 Transport 8
2.5 Ablagerung 10
3 Methodik Überblick - Grundlegende Arbeitsschritte 11
3.1 Allgemein 11
3.2 Vorgehen und Ablauf im Überblick 11
4 Vorgehen und Ablauf im Detail 14
4.1 Auftrag 14
4.2 Grundlagen 14
4.3 Ereigniskataster 15
4.4 Berücksichtigung bestehender Schutzbauten 15
4.5 Vorbereitung Begehung 16
4.6 Durchführung Begehungen 17
4.7 Szenarienbildung 19
4.8 Berechnungen und Simulationen 21
4.9 Schwachstellenanalyse 21
4.10 Ausarbeitung Intensitätskarten (IK) pro Prozessquelle (Wirkungsanalyse) 22
4.11 Überprüfung im Gelände 23
4.12 Erstellen der Gefahrenkarte (GK) 23
4.13 Produkte der Gefahrenbeurteilung (Technischer Bericht, Dokumentation) 24
5 Berechnungsansätze und Formeln 26
5.1 Reinwasserabfluss 26
5.1.1 Niederschlag 26
5.1.2 Hydrologie und Abfluss 26
5.1.3 Hydraulik 28
5.2 Fluvialer Geschiebetransport 28
5.2.1 Bestimmung von Abflussmenge 28
5.2.2 Fliesswiderstand und Fliessgeschwindigkeit 29
5.2.3 Korngrössen und Kornzusammensetzung 30
5.2.4 Berechnung des Geschiebetransportes und der Geschiebefrachten 31
5.2.5 Simulationsmodelle für Geschiebetransport 32
5.3 Murgang 33
5.3.1 Murfähigkeit 33
5.3.2 Murgangauslösung 33
5.3.3 Murgangfracht 33

5.3.4 Erosionsleistung von Murgängen 36
5.3.5 Berechnung des Maximalabfluss (Murgangabfluss) 36
5.3.6 Berechnung der Fliessgeschwindigkeit 37
5.3.7 Bestimmung der Reichweite und der Ablagerungslänge auf dem Kegel 37
5.3.8 Modelle zur Simulation von Murgängen 38
5.4 Schwemmholzaufkommen und -transport 38
5.4.1 Bestimmung von Schwemmholzfrachten 39
5.4.2 Bestimmung der Verklausungsgefahr 39
6 Weitere Themen 41
6.1 Prozessübergänge und Prozessketten 41
6.2 Präsentation/Kommunikation der Resultate 42
6.3 Umgang mit Unsicherheiten 42
6.4 Qualitätssicherung 42
6.5 Berücksichtigung des Klimawandels 43
7 Literatur 44

1 Einleitung

Das vorliegende Skript behandelt das Fachmodul Wildbäche. Der Fokus liegt bei der Beurteilung der Wildbachprozesse für die Erstellung von Gefahrenkarten. Für Beurteilungen mit anders gelagertem Fokus, z.B. das Ermitteln von Einwirkungen oder das Planen von Massnahmen, muss das Vorgehen angepasst werden.

Der Aufbau des Skripts umfasst die Definition der wichtigsten Wildbachprozesse und zeigt deren Abgrenzung zu den fluvial dominierten Gerinneprozessen. Weiter werden die wichtigsten Berechnungsmethoden und Simulationsmodelle sowie die Methodik der Gefahrenbeurteilung vorgestellt. Im Vordergrund steht dabei das Vorgehen bei den Geländeaufnahmen.

Im Skript wurde versucht, die in der Praxis und Forschung gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen zusammenzutragen. Sie repräsentieren den aktuellen Wissensstand, erheben jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Beurteilung der Wildbachgefahren erfordert neben den fachlichen Kenntnissen auch grosse Praxiserfahrung. Das Skript soll als praxisorientierte Unterstützung bei der Beurteilung von Wildbachprozessen dienen.

2 Übersicht Wildbachgefahren

Ein Wildbacheinzugsgebiet ist geprägt durch eine Vielzahl unterschiedlicher Systemkomponenten und Prozessen.

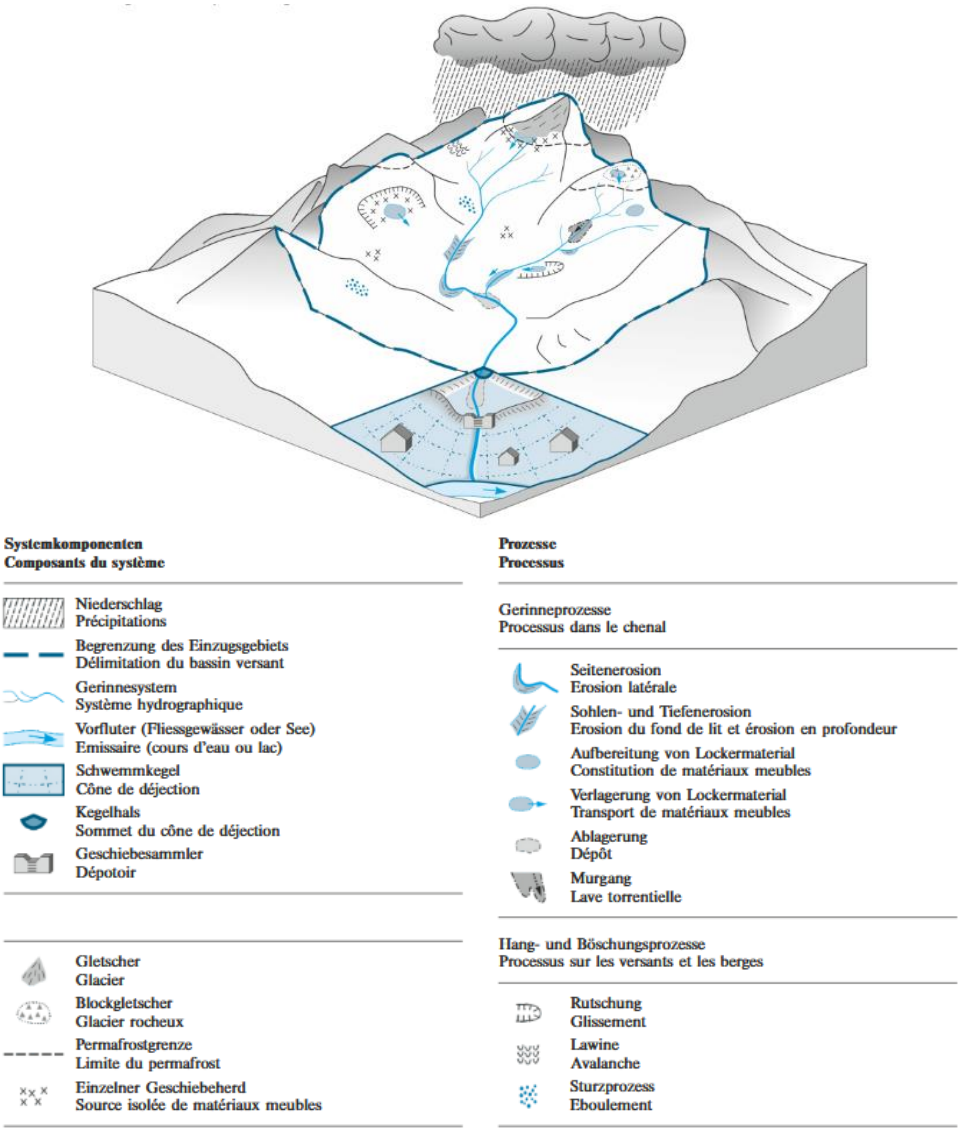


Abbildung 1 : Systemkomponenten und Prozesse im Wildbacheinzugsgebiet (HADES 7.8 [24])

2.1 Typisierung und Abgrenzung

Bei Fliessgewässern wird unterschieden zwischen **Wildbächen**, **Gebirgsflüssen**, **steilen und flachen Talgewässern** und **Talflüssen**. Die Einteilung basiert im Wesentlichen auf der Einzugsgebietsgrösse und dem Längsgefälle des Gerinnes. Die Grenzen zwischen den verschiedenen Gewässertypen sind fliessend. Gebirgsflüsse, Talflüsse und flache Talgewässer weisen gegenüber den Wildbächen einen transportlimitierten Abfluss auf und die Feststoffverfügbarkeit ist in der Regel beschränkt.

Tabelle 1: Abgrenzung der Fliessgewässer

	Wildbach	**Gebirgsfluss**	**steile - flache Talgewässer**	**Talflüsse**
Einzugsgebiet	klein - mittel	mittel - gross	klein - mittel	sehr gross
Neigung	steiler 5 - 10%	1 - 10%	alle Neigungsstufen	flacher 1%
Wasserführung	rasches Anspringen und stark variierend	langsames Anspringen, mässig variierend	rasches Anspringen und stark variierend	langsames Anspringen, wenig variierend
Transportprozess	Murgang - murgangartig	murgangartig - Geschiebetransport	(murgangartig) - fluvialer Geschiebetransport	fluvialer Geschiebetransport - Reinwasserabfluss
Transportkapazität	nicht transportlimitiert	meist transportlimitiert	nicht transportlimitiert - transportlimitiert	transportlimitiert
Bettmorphologie	Blöcke, Fels	wenige- einzelne Blöcke, Deckschicht	Deckschicht, wenige - einzelne Steine	Deckschicht
Gerinnegeometrie	unregelmässig	regelmässiger	unregelmässig - gleichförmig	gleichförmig
Kornverteilung	sehr breit	weniger breit	breit - wenig breit	homogen
Längenprofil	Kaskaden, Stufen, Becken	Becken, Bänke, verzweigtes Gerinne	alle Formen vertreten	Bänke, verzweigtes Gerinne
Sedimentspeichervermögen im Bachbett	sehr klein	klein - mittel	klein - gross	gross
Lateraler Eintrag von Sediment	sehr gross	gross - mittel	mittel - gering	sehr gering

Das vorliegende Skript befasst sich mehrheitlich mit Mobilisierungs- und Transportprozessen und beschränkt sich somit auf **Wildbäche und steile Gerinne**. Dabei ist zu beachten, dass Wildbachprozesse sich nicht auf alpine und voralpine Regionen beschränken. Grundsätzlich können Wildbachprozesse auch in steilen Gerinnen des Mittellandes auftreten, sofern Gerinneneigung und Geschiebeverfügbarkeit gegeben sind.

Innerhalb der Wildbachprozesse besteht ein breites Spektrum an Transportprozessen. Unterschieden werden:

- **Reinwasserabfluss** (Hochwasser ohne Geschiebe)
- **fluvialer Feststofftransport** (Schwebstoff, Geschiebe, Schwemmholz)
- **murgangartiger Feststofftransport** (hyperconcentrated flow)
- **Murgang**

Gemäss Definition in Bergmeister et al. [3] ist ein Wildbach "ein natürliches, dauernd oder zeitweise fliessendes Gewässer mit streckenweise grossem Gefälle sowie rasch und stark wechselnden Abflussverhältnissen. Schnell ansteigende und kurze Zeit dauernde Hochwasserereignisse erodieren grosse Mengen von Feststoffen aus dem Einzugsgebiet und dem Bachbett, transportieren und lagern diese innerhalb oder ausserhalb des Bachbettes oder im Vorfluter ab." Hervorgerufen werden Hochwasser in Wildbächen durch **Starkregen** (Gewitter) und/oder

Schneeschmelze, aber auch durch langanhaltende Niederschläge bei **Dauerregen**. Sie treten oft in Kombination mit Rutschungen auf.

Das Wildbachsystem besteht sowohl aus räumlichen wie auch aus funktionalen Komponenten. Räumlich wird unterschieden zwischen **Einzugsgebiet** (Hänge, Runsen), **Gerinnesystem** (Haupt- und Seitengerinne) und **Schwemmkegel**. Die funktionalen Komponenten umfassen die **Geschiebeaufbereitung**, die **Geschiebelieferung** in das Gerinne, die **Geschiebemobilisierung** bzw. den **Geschiebetransport** im Gerinne sowie die **Ablagerung und Umlagerung** von Geschiebe auf Flachstrecken im Gerinne aber auch ausserhalb des Gerinnes.

2.2 Disposition zur Auslösung von Wildbachprozessen

Jeder Wildbach verfügt über eine eigene Disposition. Diese ist ausschlaggebend für die 'Gefährlichkeit' des Baches. Der Begriff Disposition bezeichnet dabei die Bereitschaft oder Anfälligkeit eines Gebietes zur Bildung und Auslösung von Prozessen. Unterschieden werden Grunddisposition, variable Disposition und auslösendes Ereignis. Kienholz [32] charakterisiert diese wie folgt:

"Die **Grunddisposition** zu gefährlichen Prozessen (der 'Charakter') ist die grundsätzliche, über längere Zeit gleichbleibende Bereitschaft zu gefährlichen Prozessen. Die Grunddisposition wird bestimmt durch über längere Zeiträume konstant bleibende Parameter wie Relief, Geologie, Klima, Pflanzenbestand." Zur Grunddisposition wird beispielsweise die grundsätzliche Verfügbarkeit von Lockermaterial (Jungschutt, Altschutt, veränderlichfeste Gesteine) gezählt.

"Die **variable Disposition** (die 'Laune') ist die bei gegebener Grunddisposition zeitlich variable, in einem bestimmten Umfang schwankende oder sich entwickelnde effektive Disposition zu gefährlichen Prozessen." Zur variablen Disposition gehören die jahreszeitlichen Veränderungen, aber auch die Vorgeschichte (z.B. Feuchteverhältnisse) im Einzugsgebiet.

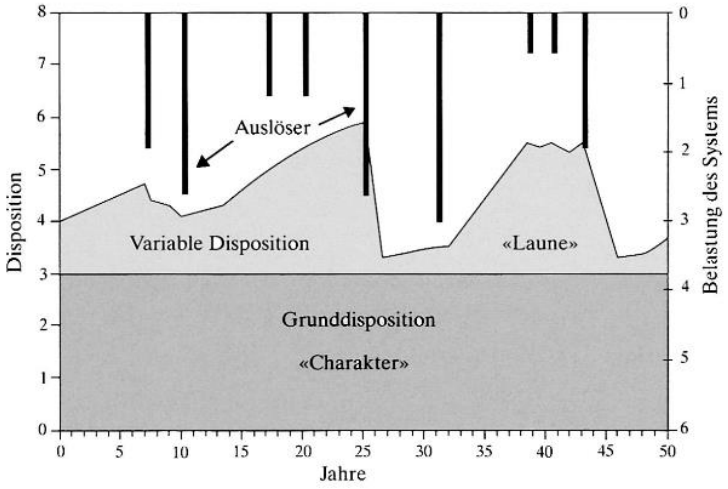


Abbildung 2 : Disposition und Auslösung von Gefahrenprozessen (aus: Zimmermann et al., 1997 [50])

Das **auslösende Ereignis** stellt die kurzfristige Belastung des Systems durch ein meist hydrologisches Ereignis dar. Es wird unterschieden zwischen kurzen Gewitterniederschlägen, langen Regenperioden, intensiver Schneeschmelze, aber auch Ausbrüchen von Gletscherseen oder Wassertaschen aus Gletschern. Weiter Auslösemechanismen können z.B. Rutschungen sein, welche in ein Gerinne fliessen und sich zu einem Murgang weiterentwickeln.

2.3 Abflussbildung und Geschiebemobilisierung

Bei der Auslösung von Wildbachprozessen spielt Wasser eine entscheidende Rolle. Dabei ist nicht nur Wasser aus dem Ereignisniederschlag massgebend, sondern auch die Wasseraufnahmefähigkeit des Untergrundes. Je weniger Wasser der Untergrund aufnehmen kann, umso kürzer sind die Fliesszeiten (Reaktionszeiten) des Niederschlagswassers bis zum Gerinne. Entsprechend steil und hoch ist die Abflussganglinie. Zudem kann bei hoher Sättigung des Bodenmaterials durch anhaltende Niederschläge vermehrt Material aus Spontanrutschungen und Hangmuren in die Gerinne eingetragen werden und dadurch weitere Prozessketten (vgl. Kapitel 6.1) auslösen.

Die Mobilisierung von Geschiebe in einem Gerinne ist ein komplexer Vorgang, welcher schwierig zu quantifizieren ist. Die Mobilisierung ist einerseits abhängig von der Verfügbarkeit von Geschiebe und andererseits von den während eines Ereignisses auftretenden Erosionsprozessen im Gerinne. Rechnerische Ansätze zur Bestimmung des Geschiebepotenzials (mobilisierbares Feststoffvolumen) liefern in der Regel eine Grössenordnung, sind aber schwierig auf Ereignisgrössen einer bestimmten Jährlichkeit umzulegen. Zudem können die vereinfachten Berechnungsansätze die lokalen Gegebenheiten nur ungenügend abbilden. Eine zentrale Bedeutung kommt daher Abschätzung des Geschiebepotenzials im Gelände zu. Mittels Begehung der zu untersuchenden Gerinne können alle notwendigen Einflussfaktoren und Gegebenheiten in einem Gerinne, aber auch die Eintragsprozesse aus den Einhängen und Runsen in guter Qualität erhoben werden. Der Zustand des Gerinnes, die Verfügbarkeit von Geschiebe, Felsstrecken, und Rutschungen in den Einhängen lassen sich nur mit Aufnahmen vor Ort in genügender Qualität erfassen.

2.4 Transport

Bei einem Hochwasserereignis in einem Wildbach werden neben Wasser auch Geschiebe und Schwemmholz verlagert. Je nach Anteil Komponenten werden unterschiedliche Transportarten unterschieden.

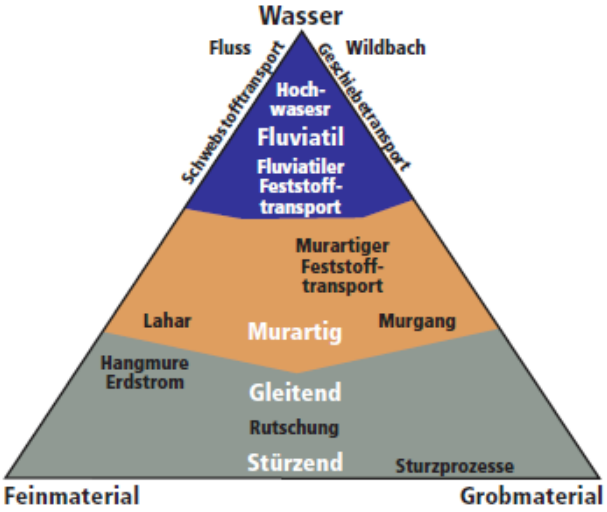


Abbildung 3 : Verlagerungsprozesse in Abhängigkeit des Komponentenanteils (aus: Optimeth [42])

Reinwasserabfluss (Hochwasser)

Reinwasserabflüsse transportieren eine sehr geringe Feststoffmenge. Die Feststoffe werden vorwiegend als Schwebstoffe transportiert. Der Geschiebetransport ist stark untergeordnet und entsprechend nicht relevant. Die Dichte des Wasser-Feststoff- Gemisches entspricht annähernd dem von Reinwasser (1000 kg/m^3). Der Abfluss kann turbulent und instationär erfolgen. Reinwasserabflüsse sind in Wildbächen für die Gefahrenbeurteilung nicht massgebend, da sie bei erhöhten Abflüssen kaum je in Reinform auftreten.

Fluvialer Geschiebetransport

Beim fluvialen Geschiebetransport findet eine intensive Verlagerung von Feststoffen statt. Der Transport des Geschiebes erfolgt sohlennah durch gleitende, rollende oder hüpfende Bewegung. Die Dichte des Wasser-Feststoff-Gemisches liegt unter 1300 kg/m^3. Die volumetrische Feststoffkonzentration beträgt bis zu 20%. Die Geschwindigkeit des transportieren Geschiebes ist kleiner als diejenige des Wassers.

Murgangartiger Geschiebetransport

Der murgangartige Geschiebetransport weist gegenüber dem fluvialen Geschiebetransport eine deutlich höhere Feststoffkonzentration auf. Der Transport findet nicht nur an der Sohle sondern über den gesamten Fliessquerschnitt verteilt statt. Aufgrund der grösseren Dichte des Wasser-Feststoff-Gemisches (1300 - 1700 kg/m^3 [3]) werden auch grössere Komponenten (dm bis m) transportiert. Die volumetrische Feststoffkonzentration liegt zwischen 20 und 40%.

Murgang

Murgänge stellen ebenfalls ein Gemisch aus Wasser, Geschiebe und Holz dar. Im Gegensatz zum murgangartigen Geschiebetransport ist aufgrund des hohen Feinanteils die Korngrösse des transportierten Materials praktisch unbegrenzt. Die Dichte des Wasser-Feststoff-Gemisches liegt gemäss Bergmeister et al. [3] zwischen 1700 - 2400 kg/m^3, die volumetrische Feststoffkonzentration bei 40 - 70%. Murgänge treten meist in mehreren Schüben auf. Die Fliessgeschwindigkeiten können selbst während eines einzelnen Ereignisses stark variieren und reichen von Schritttempo bis zu 15 m/s.

Tabelle 2: Charakteristische Kennwerte von Wildbach-Transportprozessen (aus Bergmeister [3], ergänzt)

	Reinwasserabfluss	**Fluvialer Geschiebetransport**	**Murgangartiger Geschiebetransport**	**Murgang**
Prozesstyp	Reinwasserabfluss	schwacher Feststofftransport	starker Feststofftransport	Murgangtransport
Gefällsbereich	0.1 bis 10%		steiler 5 bis 10%	
Vol. Feststoffkonzentration (ca. - Bereich)	< 1%	0 - 20%	20 - 40%	> 40%
Grösstkorn	mm - cm	bis dm	bis m	bis wenige m
Dichte (ca. - Bereich)	1000 kg/m^3	< 1300 kg/m^3	1300 - 1700 kg/m^3	> 1700 kg/m^3
$Q_{gesamt}/Q_{Hochwasser}$ [Q = Abfluss]	1	1 - 1.4	1.4 - 3.5	> 3.5
Ablagerungsformen	bankige Ablagerungen von meist feinkörnigen Kornfraktionen (Feinstoffe)	Sortierte Korngrössen. Die einzelnen Gerölle berühren sich, es befindet sich wenig Feinmaterial zwischen den Geröllen.	Gegenüber fluv. Geschiebetransport höherer Anteil Feinmaterial zwischen den Geröllen. Meist flächige Ablagerungen ohne scharfe Begrenzung	Murköpfe, Levées und zungenförmige Ablagerungen, meist scharfe Begrenzung der Ablagerung, starke Durchmischung von feinen und groben Komponenten, U-förmiges Abflussprofil im Gerinne

Begriffe:

Feststoffe*: als Feststoffe werden alle festen Stoffe bezeichnet, welche vom Wasser fortbewegt oder abgelagert werden. Sie beinhalten Schwimmstoffe, Schwebstoffe und Geschiebe.*

Schwimmstoffe*: Feststoffe, welche leichter als Wasser sind und auf dem Wasser aufschwimmen (Holz, Eis, anthropogenes Treibgut). Sie können an Engstellen wie Brücken, Rohrdurchlässen usw. zu Problemen durch Verklausung führen.*

Schwebstoffe*: feines Material der Korngrössen Sand, Silt und Ton. Aufgrund ihrer geringen Grösse werden sie durch das turbulente Wasser in der Schwebe gehalten. Schwebstoffe werden während eines Ereignisses in den Vorfluter eingetragen.*

Geschiebe*: Feststoffe, die im Bereich der Gewässersohle bewegt werden und einen grösser als Sandfraktion sind. Bei Wildbachprozessen beschränkt sich der Transport aufgrund der starken Turbulenzen des Wassers nicht nur auf die Gewässersohle.*

Während Schwimmstoffe und Schwebstoffe während eines Ereignisses in den Vorfluter eingetragen werden und das Gebiet verlassen, verbleibt das Geschiebe bei abnehmender Abflussganglinie im Gerinne (Sohlenauflandung) oder im Einmündungsbereich des Vorfluters oder wird bei Ausuferungen ausserhalb des Gerinnes abgelagert (Übersarung). Der Anteil an Schwimm- und Schwebstoffen am Gesamtabfluss ist schwierig zu bestimmen.

2.5 Ablagerung

In Wildbächen sind verschiedene Ablagerungsformen möglich. Diese sind einerseits abhängig vom Transportprozess, andererseits von der Feststoffkonzentration zum Zeitpunkt der Ablagerung. Unterschieden werden die nachfolgend aufgeführten Ablagerungsprozesse. Eine Darstellung der Ablagerungsformen ist in [38] zu finden.

Murgangablagerungen können sowohl innerhalb als auch ausserhalb des Gerinnes auftreten. Kommt ein Murgang abrupt zum Stillstand, lagert sich ein sogenannter **Murkopf** ab. Dabei handelt es sich um eine bis zu mehreren Metern mächtige Ablagerung im Gerinne, mit unsortierten Korngrössen. Meist befinden sich die grössten Komponenten an der Oberfläche. **Levées** sind wallartige Ablagerungen seitlich der Murgang-Fliessbahn, häufig auch seitlich des Gerinnes. Von **Übermurung** spricht man, wenn ein Murgang das Gerinne verlässt und sich konzentriert oder flächig ablagert. Die Ablagerungen sind unsortiert und weisen ein breites Grössenspektrum der Bestandteile (Blöcke, Geröll, Holz) auf. Das Material lagert sich oft zungenförmig ab und weist klare Begrenzungen zum nicht betroffenen Gebiet auf.

Der Begriff **Übersarung** ist im Wörterbuch Hochwasserschutz [35] wie folgt definiert: "Prozess der Ablagerung von vorwiegend groben Feststoffen, die aus dem Bett eines hochwasserführenden Fliessgewässers ausgetreten sind. [...] wird manchmal fälschlicherweise auch synonym mit "Übermurung" verwendet". Übersarung tritt in der Regel bei fluvialem Geschiebetransport und bei murgangartigem Geschiebetransport auf. Im Gegensatz zur Übermurung findet ein deutlich stärkeres Verschwemmen des Geschiebes statt und die Grenzen zum nicht betroffenen Gebiet sind oft diffus. Die Ablagerungen sind flächiger und weniger mächtig. Das Geschiebe, das bei einer Übersarung abgelagert wird, weist gegenüber Murgangablagerungen eine deutliche Sortierung auf: grobe Körner in den gerinnenahen Bereichen, feine Körner am Rand der Ablagerung.

In Gefahrenkarten wird der Prozess Übersarung der Überschwemmung zugeordnet. In der Realität treten häufig Prozessübergänge auf und eine klare Trennung zwischen Übersarung und Übermurung einerseits und Übersarung / Überschwemmung andererseits ist oft nicht möglich. Die Wahl der Prozessart ist aber sowohl bei der Festlegung der Intensitäten als auch bei der Wahl der Gefahrenstufe entscheidend.

3 Methodik Überblick - Grundlegende Arbeitsschritte

3.1 Allgemein

Die Gefahrenbeurteilung bei Wildbachgefahren sollte grundsätzlich immer auf den drei Pfeilern: Geländeaufnahmen (Situationsanalyse), Ereigniskataster (Auswertung vergangener Ereignisse) und Berechnungen/Simulationen basieren. Bei allen Arbeitsschritten der Gefahrenbeurteilung sind die drei Pfeiler zu prüfen, zu hinterfragen und soweit möglich zu berücksichtigen.

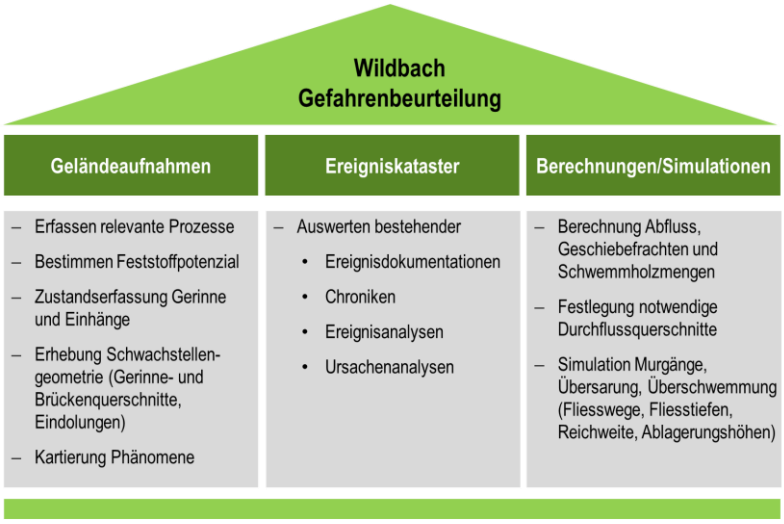


Abbildung 4 : Grundpfeiler der Gefahrenbeurteilung

3.2 Vorgehen und Ablauf im Überblick

Der konkrete Ablauf einer Gefahrenbeurteilung für Wildbäche ist in Abbildung 5 zusammengefasst. Sie zeigt die wesentlichen Schritte, die bei der Durchführung notwendig sind. Je nach Zielsetzung der Beurteilung ist die Methodik anzupassen.

In der Projektbearbeitung wird unterschieden zwischen Situationsanalyse, Wirkungsanalyse und Dokumentation.

Die **Situationsanalyse** umfasst grob die:

- Grundlagenbeschaffung: Gutachten, Kataster, Geodaten, Abfluss- und Meteodaten.
- Auswertung und Interpretation Ereigniskataster (EK), Nacherfassung historischer Ereignisse oder neuer (noch) nicht erfasster Ereignisse.
- Auswertung und Interpretation Schutzbautenkataster (SBK) als Grundlage für die Feldbegehungen und Geländeaufnahmen.
- Geländeaufnahmen zur Erfassung des Zustandes der Gerinne und der Einhänge sowie der bestehenden Schutzbauten im Einzugsgebiet (EZG).
- Festlegung der Hochwasserabflüsse (HWx), des Geschiebe- (Gx) und des Schwemmholzpotenzials (SHx) (Grundszenarien) und der Teilszenarien (Ereignisszenarien).
- Schwachstellenanalyse.

Die **Wirkungsanalyse** setzt sich zusammen aus der:

- Umsetzung der Gefahrenflächen in Intensitätskarten (IK) basierend auf gutachtlichen Beurteilungen im Gelände und Modellierungen pro massgebende Prozessquelle (PQ).
- Erstellung der Gefahrenkarte (GK).

Ein wichtiger Teil stellt die **Dokumentation** dar.

- Technischer Bericht und/oder Faktenblätter pro Prozessquelle dienen der Nachvollziehbarkeit der Beurteilung.
- **Massnahmenvorschläge** bzw. Empfehlungen für Massnahmen im Rahmen einer Gefahrenkartenerstellung sind in der Regel Bestandteil der Dokumentation. Sie werden in unterschiedlicher Bearbeitungstiefe durchgeführt und umfassen mindestens die Zusammenstellung von Massnahmenvorschlägen. Häufig werden sie mit einfachen Massnahmenbewertungen ergänzt.
- Zur Dokumentation gehören auch die **Datenerfassung** und **Datendokumentation** im GIS und Abgabe der Geodaten im entsprechenden Format.

Ablauf Gefahrenbeurteilung Wildbachprozesse

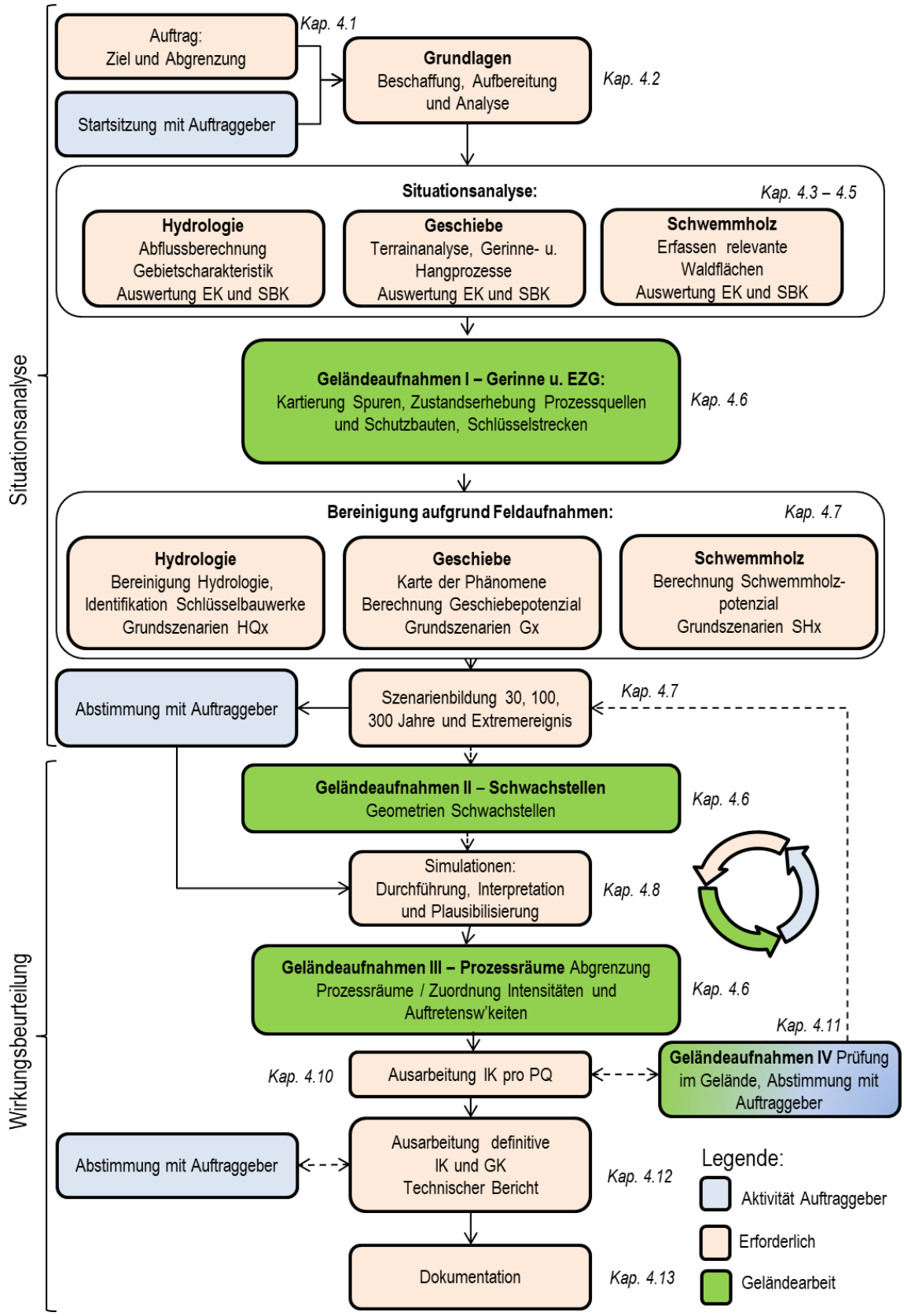


Abbildung 5: Schematischer Ablauf einer Wildbachbeurteilung im Rahmen der Erstellung einer Gefahrenkarte. Abkürzungen: EK = Ereigniskataster, SBK = Schutzbautenkataster, EZG = Einzugsgebiet, HQx, Gx, SHx = Abflussspitze, Geschiebefracht (-potenzial), Schwemmholzfracht (-potenzial) einer bestimmten Wiederkehrperiode von x Jahren, IK = Intensitätskarte, GK = Gefahrenkarte, PQ = Prozessquelle)

4 Vorgehen und Ablauf im Detail

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die einzelnen Arbeitsschritte bei der Gefahrenbeurteilung vertieft eingegangen. Der Ablauf entspricht im Wesentlichen dem in Abbildung 5 dargestellten Ablauf.

4.1 Auftrag

Dem Bearbeitenden müssen Inhalt und Ziel des Auftrages und die zu bearbeitenden Punkte klar sein.

- Was ist der **Hintergrund** des Auftrages (z.B. Erstmalige Gefahrenbeurteilung eines einzelnen Wildbaches oder Beurteilung eines grösseren Gebietes, Aktualisierung einer bestehenden Gefahrenbeurteilung, Zweitmeinung zu einer bestehenden Beurteilung, Beurteilung eines speziellen Ereignisses)?
- **Perimeter**, der zu beurteilen ist. Umfasst der vorgegebene Perimeter das gesamte beitragende Einzugsgebiet?
- Welche **Prozesse** sind zu beurteilen?
- Welche **Resultate** werden erwartet, in welchem Umfang und bis wann?
- Einstufung des **Schwierigkeitsgrades**. Bei sehr komplexen Fragestellungen sind allenfalls erfahrene Experten (frühzeitig) hinzuzuziehen. Spielen weitere Prozesse eine relevante Rolle, sind entsprechende Prozessspezialisten beizuziehen?
- Welcher **Detaillierungsgrad** in der Bearbeitung ist notwendig, um die Aufgabenstellung des Auftrages erfüllen zu können?
- Zeigt sich aus der Auftragsanalyse, dass **Anpassungen** am ursprünglichen Auftrag notwendig sind, sind diese frühzeitig mit dem Auftraggeber zu klären.

4.2 Grundlagen

Die für die Gefahrenbeurteilung relevanten Grundlagen müssen verfügbar sein und sind zu beschaffen.

- **Geodaten** beschaffen: Terraindaten (DGM, DOM, swissalti3d, etc.), Landschaftsmodell, Basisplan, Luftbilder/Orthophoto, Gewässernetz, Waldbestand, Ereigniskataster, Schutzbautenkataster, Gefahrenkarten, bestehende Gefahrenbeurteilungen, Gefahrenhinweiskarte, Karte der Phänomene, Geologische Karten, Gefährdungskarte Oberflächenabfluss.
- Konsultieren der **Niederschlags- und Abflussdaten**. Angaben zu Niederschlägen finden sich in: HADES [24], Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes [22] und Extremwertanalysen [28]. Angaben zu Abflussdaten können den kantonalen und schweizerischen Abflussmessstationen entnommen werden (https://www.hydrodaten.admin.ch).
- **Digitales Geländemodell:**
  - Datenqualität prüfen: Ein Geländemodell kann Fehler bei Stützpunkten, Bruchkanten, Geländerücken oder Geländeterrassen beinhalten. Kleine Brücken sind häufig ungenügend aus den Daten herausgefiltert. Bei einer Modellierung kann dies zu Fehlern führen. Eine visuelle Überprüfung kann anhand von Höhenkurven oder der Reliefschattierung erfolgen.
  - Genügende Auflösung des Geländemodells: in der Regel ist eine Auflösung von 2 – 5 m Rasterauflösung genügend (z.B. SwissAlti3D). Jedoch werden kleine Gerinne mit Sohlenbreiten von weniger als 4 m im Geländemodell nur ungenügend abgebildet. Wird das Geländemodell für Simulationen verwendet, ist die in der Modellbeschreibung geforderte Auflösung anzustreben.

  - Aktualität: Erstellungsdatum des Geländemodells prüfen. Repräsentiert das Terrainmodell (noch) das aktuelle Terrain? Stimmt die Überbauung mit Gebäuden und deren Umgebung mit dem Terrainmodell überein? Erdverschiebungen, Gletscherrückgang oder erstellte Schutzmassnahmen wie Dämme sind in älteren Geländemodellen häufig nicht enthalten, können Simulationen aber massgeblich beeinflussen. Zusammen mit dem Auftraggeber oder Lokalkennern sind allfällige Veränderungen abzuklären.
  - Abdeckung des gesamten Projektgebietes. Einzugsgebiete und Wirkungsgebiete müssen vollständig abgedeckt sein.
  - Geländeveränderungen.
- **Vollständigkeit** der verfügbaren Unterlagen prüfen (z.B. Literaturangaben von Berichten durchsehen).
- **Technische Berichte und Projektunterlagen** beschaffen. Berichte zu vorhandenen Gefahrenabklärungen sind zu beschaffen und zu analysieren. Es ist zu prüfen, ob sie noch gültig sind respektive welche Veränderungen in der Zwischenzeit aufgetreten sind (z.B. neue Schutzbauten, neue Gebäude, Terrainveränderungen). Auch neue Erkenntnisse (z.B. höhere Niederschlagsmengen) oder angepasste Methodik, neue Berechnungsmodelle und -ansätze können eine Neubeurteilung notwendig machen.
  Bei den Projektunterlagen (z.B. Schutzbauten, Bauprojekte) sind Angaben zu Baujahr, Abmessung, Geometrie und Bewehrung) zu beschaffen.

4.3 Ereigniskataster

Der Ereigniskataster ist eine der wichtigsten Grundlage bei einer Gefahrenbeurteilung. Mit Informationen zu Ausdehnung, Auswirkung und Häufigkeit von Ereignissen liefert er wertvolle Hinweise bei der Ausscheidung von Gefahrenflächen. Die sorgfältige Analyse eines gut dokumentierten Ereignisses kann viel zum Verstehen der Wildbachprozesse beitragen.

- Analyse der **dokumentierten Ereignisse**:
  - Wodurch wurde das Ereignis ausgelöst?
  - Welche Prozesse sind aufgetreten?
  - Wo befanden sich die Schwachstellen?
  - Wie gross waren die Reichweiten der Prozesse?
  - Sind Angaben zu Geschiebevolumen vorhanden (Erosionen im Gerinne, Ablagerungen ausserhalb des Gerinnes, Füllungsgrad von Geschiebesammlern, usw.)?
- Interpretation von **Schäden.**
- Kritische Einschätzung der **Plausibilität** von Aufzeichnungen.
- Auswertung der **Ereignishäufigkeit**: sind im Ereigniskataster viele Ereignisse aufgeführt, kann daraus die Auftretenshäufigkeit abgeleitet werden.
- Vergleich verschiedener **Luftbild**- und **Kartenstände.**
- Konsultation von (Bild-) **Archiven** (z.B. https://www.e-pics.ethz.ch, https://map.geo.admin.ch, Lubis-Viewer).

4.4 Berücksichtigung bestehender Schutzbauten

Schutzmassnahmen, welche eine Wirkung auf den Prozessablauf haben, sind bezüglich Zustand und Wirksamkeit zu erfassen und zu prüfen. Die Überprüfung erfolgt im Gelände.

- Wann und zu welchem Zweck wurde die Schutzbaute erstellt? Liegen Projektpläne und Baupläne dazu vor? Liegen Angaben zur Dimensionierung der Schutzbaute vor?
- Wie ist der aktuelle **Zustand** der Schutzbaute?

- Erfüllt die Schutzbaute heute die notwendige Funktion?
- Bei Geschiebesammlern: sind die angegebenen **Volumen** (mit oder ohne Verlandungsgefälle) korrekt?
- Bestehen **neue Schutzbauten**, welche nicht im Schutzbautenkataster aufgeführt sind?
- **Wirkung** der Schutzbauten auf den Gefahrenprozess.
- **Verhalten** der Schutzbauten **im Lastfall und bei Überlast**. Welche zusätzliche Gefährdung kann bei einem Versagen entstehen?
- Bestimmung der Zuverlässigkeit nach **PROTECT** [43] (http://www.planat.ch/de/infomaterial-detailansicht/datum/2014/11/26/planat-projekt-a3-wirkung-von-schutzmassnahmen/).
- Im Technischen Bericht, respektive in den Faktenblättern der einzelnen Prozessquellen ist aufzuführen, welche Schutzbauten berücksichtigt wurden, respektive bei welchen Szenarien mit einer eingeschränkten Zuverlässigkeit gerechnet werden muss oder ein allfälliges Versagen angenommen wird.

4.5 Vorbereitung Begehung

Mit einer guten Vorbereitung kann eine Geländebegehung effizient durchgeführt und sichergestellt werden, dass keine wichtigen Punkte vergessen werden.

- Was will resp. muss gesehen werden, um einen guten **Eindruck des Wildbaches** zu erhalten? Z.B. relevante Gerinneabschnitte (Felsstrecken, Lockermaterialstrecken, Flachstrecken, Steilstufen), mögliche Rutschgebiete, Schwachstellen (Brücken, Eindolungen, Abschnitte mit ungenügendem Gerinnequerschnitt), usw.
- Studium der **Grundlagen**: Bereits aus den Auswertungen der Grundlagen, insbesondere dem Geländemodell (Reliefschattierung), Luftbildern und des Basisplan kann bereits eine erste Grobbeurteilung der Situation stattfinden. Diese kann dazu verwendet werden, die Begehungsroute so zu planen, dass die relevanten Stellen (z.B. Hanginstabilitäten, Geschiebeherde, Engstellen, etc.) gezielt begangen werden können.
- Beurteilung des **Geländemodells**: Die Auswertung des Geländemodells liefert viele wertvolle Informationen. So liefern die Neigungsverhältnisse Informationen zu mögliche Startzonen von Murgängen, in der Reliefschattierung sind potenzielle Rutschgebiete, aber auch Fliesspuren und Ablagerungsspuren von Murgängen erkennbar.
- Evtl. **Übersichtsmodellierungen:** Übersichtsmodellierungen sind Simulationen, die mit einer Standard-Parameterwahl ausgeführt werden, um eine erste Übersicht zu erhalten. Sie können helfen, kritische Fliesswege oder Ablagerungsbereiche zu erkennen. Anstelle von Übersichtssimulationen können grundsätzlich auch Gefahrenhinweiskarten (SilvaProtect-CH, Gefährdungskarte Oberflächenabfluss, beide einsehbar unter https://map.geo.admin.ch/) verwendet werden. Aufgrund der teilweise sehr groben Eingangsparameter in den Modellrechnungen sind diese Grundlagen aber nur bedingt für den Massstab einer Gefahrenbeurteilung auf Stufe Gefahrenkarte oder Gefahrengutachten geeignet und nur zulässig für eine erste Grobeinschätzung.
- Mögliche **Schlüsselstellen** für den Prozessablauf evaluieren, die im Gelände zu begutachten sind (z.B. Aufteilung in verschiedene Fliesswege, Flachstrecken mit hohem Ablagerungsvermögen).
- Planung des **Ablaufs der Begehung**: Begehungsroute festlegen, Kartenmaterial (Basisplan, Höhenkurvenplan, Karte mit Reliefschattierung, Karte mit Schutzbauten und Ereigniskarten) bereitstellen. Bewilligung für Fahrwege einholen.
- Je nach Gerinne und Fragestellung kann es sinnvoll sein, bereits für die Begehung eine **Unterteilung** der zu untersuchenden **Gewässerabschnitte** vorzunehmen.

- **Wetterverhältnisse** und **Zeitpunkt** der Begehung: Bei schlechten Wetterbedingungen kann eine Begehung nutzlos sein, da die Sichtweiten stark reduziert sein können. Bei Begehungen im Sommer ist aufgrund der üppigen Vegetation häufig der Einblick in die Gerinne reduziert. Optimal sind Begehungen im Frühfrühling und Spätherbst.
- **Arbeitssicherheit**: Begehungen sollten, wenn möglich zu zweit durchgeführt werden, da sie häufig in exponiertem Gelände stattfinden. Bei jeder Begehung muss dem Aspekt der eignen Sicherheit Rechnung getragen werden: Wetterprognosen konsultieren, Kontaktperson bestimmen, keine unnötigen Risiken eingehen, Mitführen eines Natels und/oder eines Ortungsgerätes, Tragen geeigneter Arbeitskleidung und Schuhwerk, usw.

4.6 Durchführung Begehungen

Das Ziel von Begehungen ist, eine klare Vorstellung über potenzielle Prozessabläufe, Fliesswege, Ablagerungsbereiche, Schwachstellen usw. zu erlangen, um so die Wildbachprobleme möglichst gut zu verstehen. Auf Geländebegehungen darf auf keinen Fall verzichtet werden.

Geländeaufnahmen finden in allen Phasen der Gefahrenbeurteilung statt. Im Rahmen der **Situationsanalyse** wird der Zustand der Einzugsgebiete und der Gerinne erfasst. Bei der **Schwachstellenerfassung** werden die Geometrien möglicher Schwachstellen erhoben. In der **Wirkungsanalyse** werden die betroffenen Prozessflächen abgegrenzt und anschliessend die Resultate aus der Wirkungsbeurteilung und aus Modellierungen im Gelände **verifiziert**.

Der Übersicht halber sind nachfolgend alle Geländeaufnahmen (I - IV) nacheinander beschrieben. Bei der Gefahrenbeurteilung werden sie aber in den jeweiligen Phasen gemäss Abbildung 5 ausgeführt.

Geländeaufnahmen I: Situationsanalyse

- Die Geländeaufnahmen im Rahmen der Situationsanalyse finden weitgehend im **Einzugsgebiet** statt. Sie umfassen die folgenden Arbeitsschritte:
  - Erfassen der Geschiebequellen im Einflussbereich der Gerinne.
  - Bestimmen der Erosionsleistungen in allen relevanten Gerinneabschnitten. Dies bildet die Grundlage für die Beurteilung des Geschiebepotenzials und der Geschiebefrachten.
  - Aufnahmen zur Ermittlung der Kornverteilung des Geschiebes in den massgebenden Transportstrecken.
  - Bestimmen der Lockermaterial- und Felsstrecken.
  - Bestimmen der Erosions-, Umlagerungs- und Ablagerungsstrecken.
  - Erfassen des Schwemmholzpotenzials.
  - Aufnahme von stummen Zeugen (Karte der Phänomene): Murgangspuren (auch das Fehlen von Murgangspuren ist aussagekräftig), Rutschprozesse etc.
  - Überprüfung/Erfassen der bestehenden Schutzbauten im Einzugsgebiet, inkl. Beurteilung von Funktion, Zustand und Wirkung.
- Hilfreich können auch **Betrachtungen vom Gegenhang** aus sein. Dadurch kann ein guter Überblick verschafft werden.
- Erfassen der notwendigen **Eingangsgrössen** für allfällige Prozesssimulationen.

Geländeaufnahmen II: Schwachstellenanalyse

- Bei der Schwachstellenanalyse werden die Geometrien möglicher Schwachstellen direkt im Gelände erhoben:
  - Erfassen möglicher Schwachstellen: Brückendurchlässe, Eindolungen, kritische Gerinneabschnitte.

Geländeaufnahmen III: Wirkungsanalyse

- **Wirkungsgebiet** (Schwemmkegel, Talboden): in diesem Schritt werden basierend auf den Szenarien und der Schwachstellenanalyse die möglichen betroffenen Prozessflächen bestimmt. Die Bestimmung erfolgt gutachtlich im Gelände. Karten mit einer detaillierten Darstellung der Terrainverhältnisse (Reliefschattierung, Höhenkurven), bilden eine gute Grundlage. Allfällige Modellierungen stellen weitere Hilfsmittel dar, sind aber vor Ort kritisch zu prüfen.
- Im **Gelände** werden folgende Arbeiten durchgeführt:
  - Bestimmen der möglichen Fliesswege im Gelände und unter Zuhilfenahme von Höhenkurvenkarten und Reliefschattierung und wenn vorhanden Modellierungen.
  - Überprüfung der Schutzbauten im Wirkungsgebiet: stimmen die Angaben z.B. zu Volumen bei Geschiebesammlern, im Vergleich zum Schutzbautenkataster oder zu den Projektunterlagen? Wie ist der Zustand der Schutzbauten (Beurteilung gemäss PROTECT)?
  - Nachvollziehen historischer Ereignisse (z.B. bis wo ist der Murgang geflossen, wo kam es zu Ausuferungen, wie hoch waren die Ablagerung im Dorf).
  - Befragung von Augenzeugen: oft können in Diskussion vor Ort Lokalkennern detaillierte Auskünfte zu vergangenen Ereignissen liefern.

Geländeaufnahmen IV: Überprüfung der Resultate

- Resultate der Gefahrenbeurteilung sind, wenn immer möglich im Gelände zu plausibilisieren. Insbesondere wenn die Beurteilung massgeblich auf Modellierungen basiert (Hinweise zu Berechnungen und Modellierungen folgen in Kapitel 4.8). Wichtige Fragestellungen in diesem Zusammenhang sind:
  - Sind die Fliesswege richtig abgebildet, Hindernisse korrekt berücksichtigt und Abgrenzungen plausibel?
  - Sind die beurteilten Prozesse (Murgang/Übersarung, Übersarung/Überschwemmung) richtig zugeordnet und die Intensitäten plausibel? Sind die Indices der Gefahrenkarte korrekt?

Arbeitstechniken bei Geländeaufnahmen

- Folgende **Arbeitstechniken** bewähren sich bei der Arbeit im Gelände
  - Fotodokumentation erstellen: besser zu viele Fotos aufnehmen als zu wenige. Mit GPS Trackern können Fotos auf einfache Art verortet werden.
  - Kurze Video-Sequenzen mit gleichzeitigem fachlichem Kommentar können an Stelle von Fotos, Notizen und detaillierten Karteneinträgen die Feldarbeit und die spätere Dokumentation erleichtern.
  - Die Erkenntnisse aus der Begehung in schriftlicher Form (Feldnotizen oder Zusammenfassung) erfassen.
  - Nach der Feldaufnahme: Backups Feldpläne, Notizen erstellen, Fotos ablegen.

4.7 Szenarienbildung

Die Szenarienbildung umfasst Berechnungen und Abschätzungen zur Abflusskapazität und zum Feststoffhaushalt. Dabei wird festgelegt, welche Hochwasser- oder Murgangereignisse in welcher Grössenordnung in Zukunft auftreten können. Die Szenarienbildung ist eine wesentliche Grundlage für die Gefahrenbeurteilung und die Durchführung von Simulationen.

Allgemein

"Szenarien stehen stellvertretend für mögliche zukünftige Ereignisse und Ereignisabfolgen. Während eines Ereignisses sind unterschiedliche Abläufe vorstellbar, die sich sprunghaft verstärken, überraschend verändern oder anders als erwartet entwickeln können. Wegen dieser grossen Vielfalt und Komplexität der Prozessabläufe muss bei der Gefahrenbeurteilung mit Szenarien gearbeitet werden. Jedem Szenario wird eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet." (aus BAFU (2016), S. 44 [5]).

- **Szenariendefinition**: Dies umfasst generell die Festlegung der Szenarien für die zu untersuchenden Prozessquellen und Wiederkehrperioden
- **Szenarienbildung**: Bei der Szenarienbildung sind alle möglichen Ereignisabläufe zu prüfen, auch wenn sie unwahrscheinlich erscheinen: "Das Undenkbare denken".
- **Szenarienwahl**: In der Szenarienwahl wird festgelegt, mit welchen Annahmen weitergearbeitet wird. In der Dokumentation ist aufzuzeigen, welche Szenarien (Grundszenarien, Ereignisablaufszenarien) berücksichtigt oder verworfen wurden.
- Unterschieden werden **Grundszenarien** und **Ereignisablaufszenarien:**
  - **Grundszenarien**: Abfluss-, Geschiebe- und Schwemmholzmengen. Sie werden in der Regel für die Jährlichkeiten 0 - 30 (häufige Ereignisse), 30 - 100 (mittlere Ereignisse), 100 - 300 Jahre (seltene Ereignisse) sowie für das **Extremereignis** (EHQ, G_{Extrem}) festgelegt.

    Die Grundszenarien entsprechen einem Jährlichkeitsbereich. Wird nur die obere Bereichsgrenze (z.B. HQ100) angegeben, gilt diese für den gesamten Bereich.
  - **Teilszenarien**: auch Ereignis- oder Ereignisablaufszenarien genannt. Sie umfassen nebst den eigentlichen Grundszenarien (Abfluss, Geschiebe, Schwemmholz) das Zusammenspiel von Schwellenprozessen, Prozesswechseln und Prozessverkettungen (z.B. Wechselwirkungen Seitenbäche - Vorfluter, Wechselwirkung mit Rutschungsprozessen). Zur Festlegung der Teilszenarien gehören auch die Berücksichtigung von Verklausungen bei Durchlässen und das Versagen von Bauwerken.
- Berücksichtigung von **bestehenden** und **geplanten** Schutzmassnahmen bei der Szenarienbildung klären: Bestehende Schutzmassnahmen werden bei der Szenarienbildung nur dann in positiver Weise berücksichtigt, wenn Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Massnahme gegeben sind. Die Beurteilung erfolgt für sämtliche Wiederkehrperioden (30-, 100-, 300 Jahre, Extremereignis). Geplante Massnahmen werden in der Regel nicht berücksichtigt. Es ist frühzeitig mit dem Auftraggeber zu klären, ab welchem Projektierungsrespektive Ausführungsstand Schutzmassnahmen berücksichtigt werden.

Hydrologie und Abflussmengen

- Bestimmen von **Abflussmengen** (Ereignisabfluss) für alle massgebenden Stellen im Gerinne (nicht nur am Kegelhals). Die Spitzenabflüsse sind abhängig vom Transportprozess und sind mit den entsprechenden Berechnungsansätzen zu berechnen (siehe Kapitel 5). Grundlage für die meisten Berechnungen bilden Angaben zum Reinwasserabfluss.

- Die Abflussmengen werden für Ereignisse mit einer **Jährlichkeit von 0 - 30, 30 - 100 und 100 - 300 Jahren** (HQ30, HQ100, HQ300) sowie für ein **Extremereignis** (EHQ) berechnet. Je nach Fragestellung können auch weitere Auftretenswahrscheinlichkeiten zu bearbeiten sein.

- Berücksichtigung und **Plausibilisierung** von Abflusswerten aus Hydrologiestudien und Massnahmenprojekten.

Geschiebeaufkommen - Potenzial und Frachten

- **Quantifizieren** der ereignisbezogenen Geschiebemengen (**Geschiebepotenzial**) anhand der im Rahmen der Situationsanalyse während der Geländebegehung erfassten Geschiebequellen und empirischen Berechnungsansätze (siehe Kapitel 5). Zu berücksichtigen sind Erosionen im Gerinne (Sohle, Ufer) sowie der Geschiebeeintrag durch Rutschungen. Ein spezielles Augenmerk ist auf Interaktionen zwischen Rutschungen und Gewässer zu richten.
- Geschiebepotenzial und Geschiebefrachten werden für Ereignisse mit einer **Jährlichkeit von 0 - 30, 30 - 100 und 100 - 300 Jahren** (G30, G100, G300) sowie für ein **Extremereignis** (G_{Extrem}) berechnet. Je nach Fragestellung können auch weitere Auftretenswahrscheinlichkeiten zu bearbeiten sein.
- Die Quantifizierung der Geschiebemengen erfolgt **abschnittsweise**. Dazu wird das Gerinne in bezüglich Geschiebemobilisierung homogene Abschnitte unterteilt. Für jeden Abschnitt werden die ereignisspezifischen Feststoffmengen bestimmt. Die Einteilung der Gerinneabschnitte basiert auf den Erkenntnissen aus der Geländebegehung.
- Anleitungen zur Erhebung des Geschiebepotenzials und der Geschiebefrachten finden sich in: SEDEX, 2011 [21], Gertsch, 2009 [23] oder Lehmann, 1996 [46].
- Bestimmung von **Auflandungs- und Erosionsstrecken** für die die Bilanzierung der Geschiebefrachten.
- Berechnung der **Geschiebefracht**: Unter Geschiebefracht versteht man die an einer spezifischen Stelle tatsächlich ankommenden Murgang- oder Geschiebemenge. Sie wird durch Gegenüberstellung der mobilisierbaren Menge (Potenzial) mit der effektiv transportierten Menge ermittelt. Die Fracht ist einerseits abhängig von der **Transportkapazität** und andererseits von möglichen **Verlusten** durch Ausuferungen.

Schwemmholz

- **Quantifizieren** der im Rahmen der Situationsanalyse erfassten Schwemmholzquellen (bestockte Bereiche im Hochwasserbereich, Eintrag von Schwemmholz aus Rutschungen, bestehendes Schwemmholz/Totholz im Gerinne).
- Beurteilen der Auswirkungen von **Transportdistanz** und dem Einfluss der **Gerinne-geometrien** auf die **Form** der Schwemmholzstücke (Länge, Abrasion).
- Bestimmen des **Schwemmholztyps** (Stammholz, Astholz, Wurzelstöcke, Frischholz, Totholz).
- Bestimmung der **Schwemmholzvolumen** mittels empirischer Berechnungsansätze (siehe Kapitel 5) oder eigenen Ermittlungsmethoden (gutachtlich). Plausibilisierung des Schwemmholzpotenzials mit bekannten Ereignissen und ähnlichen Einzugsgebieten, resp. lokalen Gebietskennern und Fachpersonen.
- Berechnung der **Schwemmholzfracht** durch Gegenüberstellung des Schwemmholz-potenzials mit der effektiv transportierten Schwemmholzmenge. Dabei werden Verklausungen, Hängenbleiben im Bereich der Uferbestockung oder Ablagerung aufgrund zu geringer Wassertiefen berücksichtigt.
- Schwemmholzpotenzial und Schwemmholzfrachten werden meist als Grundlage für die Beurteilung der Verklausungswahrscheinlichkeit an Brücken erhoben. Dabei werden häufig nur qualitative Angaben (viel, mässig, wenig) gemacht. Sind detailliertere Angaben notwendig, werden auch die Schwemmholzszenarien für Ereignisse der **Jährlichkeit von 0 - 30, 30 -100 und 100 - 300 Jahren** (SH30, SH100, SH300) sowie für das **Extremereignis** (SH_{Extrem}) bestimmt.

4.8 Berechnungen und Simulationen

Das Ziel von Berechnungen und Simulationen ist die Bestimmung verschiedener Prozessgrössen (Fliesshöhen, Fliessgeschwindigkeiten, Reichweiten, usw.). Sie unterstützen die Geländearbeit mit quantitativen Angaben. Ergeben sich zwischen Geländeaufnahmen und Berechnungen/Simulationen Differenzen, sind Annahmen und Resultate nochmals zu überprüfen.

Folgende Berechnungen und Simulationen sind bei der Gefahrenbeurteilung von Wildbächen vorzunehmen. Sie erfolgen immer in Kombination mit Geländeaufnahmen. Sei es, um die notwendigen Berechnungsparameter im Gelände zu erheben oder die Geländeaufnahmen anhand der Berechnungen zu plausibilisieren.

Angaben zu Berechnungsansätzen und Simulationsmodellen sowie Verweise auf entsprechende Literatur finden sich in Kapitel 5 und befassen sich mit den folgenden Aspekten:

- Berechnen des **Geschiebeaufkommens** (Geschiebepotenzial, Geschiebefrachten).
- Bestimmen der **Transportkapazitäten** bei fluvialem Geschiebetransport und bei murgangartigem Transport für alle massgebenden Gerinneabschnitte. Flachstrecken müssen eine relevante Länge aufweisen, um als Ablagerungsstrecke zu wirken.
- Berechnen der **Schwemmholzmengen**.
- Berechnung **Hochwasser**- und **Murgangabflüsse.**
- Durchführen von **Murgang- und Überschwemmungssimulationen** zur Bestimmung der Prozessfläche.

4.9 Schwachstellenanalyse

Bei der Schwachstellenanalyse wird das Gerinne in Bezug auf Ausbruchstellen, Stellen mit Ufererosion, Verklausungsgefahr und Auflandungsgefahren untersucht.

- Als Schwachstellen gelten:
  - Brückendurchlässe oder Eindolungen mit ungenügender Durchflusskapazität (bezogen auf die Teilszenarien
  - Ungenügende Abflusskapazität im Gerinne
  - Querschnittsverengungen durch seitlichen Einstoss von Rutschungen
  - Gerinneabschnitte oder Stellen mit starker Ufererosion
  - Brücken oder Eindolungen an denen es zu Voll- oder Teilverklausung durch Schwemmholz und Geschiebe kommt oder aufgrund ungenügender Durchflusskapazität
  - Flachstrecken an welchen es zu relevanten Auflandungen kommen kann
- Die Erfassung möglicher Schwachstellen erfolgt weitgehend im Gelände. Unterstützend können digitale Terrainmodelldaten beigezogen werden.
- Erfasst werden die benötigten **Geometrien**. Breite, Höhe und Gerinneneigung bei Brücken und im freien Gerinnequerschnitt, Hindernisse im Durchflussprofil, Uferbestockung, Sohlenrauhigkeiten, Schutzvorrichtungen vor Durchlässen (Rechen, Sammler, usw.).
- Bestimmen der **Abflusskapazität**: Sind die Geometrien möglicher Schwachstellen/-strecken erfasst, sind die Abflusskapazitäten unter Berücksichtigung eines Freibordes zu bestimmen. Die Methoden zur Kapazitätsberechnung erfolgen in der Regel für Reinwasserabflüsse. Erhöhungen des Wasserspiegels aufgrund von Geschiebetransport und Ablagerungen sind zu berücksichtigen. Die Abflusskapazität wird den Ereignisabflüssen gegenübergestellt.
- Berücksichtigung **Freibord**: Bei der Bestimmung der Abflusskapazität bei Reinwasserabflüssen und fluvialem Geschiebetrieb ist ein Freibord zu berücksichtigen. Dadurch können allfällige Unschärfen bei der Beurteilung der Ereignisabflüsse oder hydraulische Prozesse wie Wellenbildung, Rückstau an Hindernissen oder der benötigte Platz bei Schwemmholztransport

abgebildet werden. Bei Wildbächen mit murgangartigen Abflüssen und Murgängen sind die Unsicherheiten bezüglich Abflussmenge und Fliessgeschwindigkeiten häufig so gross, dass eine zusätzliche Berücksichtigung eines Freibordes wenig Sinn macht. Hier gilt eher abzuklären, wie sich die Situation über die Zeit verändern kann (z.B. Ablagerungen im Gerinne, mehrere Murschübe).

- Für die Bestimmung des Freibordes wird heute in der Regel die Empfehlung der Kommission Hochwasserschutz (KOHS, [19]) angewendet. Es empfiehlt sich, mit dem Auftraggeber vorgängig abzuklären, wie genau das Freibord bei der Gefahrenbeurteilung anzuwenden ist, d.h. ab wann genau mit Überschwappen, Überfliessen mit Verklausungen gerechnet wird. Das gewählte Vorgehen ist in der Dokumentation nachvollziehbar darzulegen.
- Bestimmen der **Verklausungswahrscheinlichkeit** unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Schwemmholz, Vorhandensein hydraulisch ungünstiger Faktoren (ins Profil ragende Brückenwiderlager, Brückenpfeiler, Abstürze unmittelbar vor einem Übergang oder einer Eindolung, abrupte Profil- und Richtungsänderungen vor einem Übergang oder einer Eindolung, Auflandungen, fehlende Auffangvorrichtungen für Schwemmholz oder Auffangeinrichtungen mit ungenügendem Rückhalteraum, Leitungen und Rohre, welche die lichte Höhe verringern).
- Erfassen von Gerinneabschnitten mit **Seitenerosion**: Für die Bestimmung von Abschnitten mit relevanter Seitenerosion wird heute in der Regel die Empfehlung FAN/KOHS (2015) [15] angewendet.

4.10 Ausarbeitung Intensitätskarten (IK) pro Prozessquelle (Wirkungsanalyse)

Ausgehend von den festgestellten Schwachstellen werden für die relevanten Szenarien die Wirkungsflächen und ihre Intensitäten (basierend auf den Kriterien Fliessgeschwindigkeit, Fliesstiefe, Ablagerungsmächtigkeit) festgelegt.

- Die Ausscheidung der Wirkungsflächen erfolgt für 30-, 100- und 300-jährliche Ereignisse. Für das Extremereignis wird in der Regel nur die prozessumhüllende Fläche erfasst, ohne Beurteilung der Intensitäten. In einigen Kantonen wird jedoch auch für das Extremereignis eine Intensitätskarte erstellt. Die erwarteten Produkte sind vorgängig mit dem Auftraggeber zu klären.
- Die Abgrenzung der Wirkungsflächen erfolgt im Gelände. Werden Modellierungen für die Festlegung der Wirkungsflächen verwendet, sind diese zwingend im Gelände zu plausibilisieren.
- Für die Intensitätsklassen gelten die Vorgaben aus den Empfehlungen zur Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten (BAFU, 1997)[12] . Darin sind die Kriterien der Intensitätsbewertung prozessspezifisch aufgeführt.
- Murgangprozesse weisen aufgrund der intensiven Feststoffverlagerung sehr starke Einwirkungen auf. Schwache Intensitäten werden bei dieser Prozessart nicht ausgeschieden.
- Die Übergänge zwischen Überschwemmung und Übersarung einerseits und Übersarung und Murgang andererseits sind in der Natur kontinuierlich und können daher in der Regel nicht eindeutig abgegrenzt werden. Bei der Beurteilung der Wirkungsflächen ist eine Zuweisung jedoch zwingend, da unterschiedliche Intensitätskriterien zur Anwendung kommen.
- Der Prozess Übersarung wird in der Regel der Prozessgruppe 'Überschwemmung' zugeordnet, da er immer mit einer dynamischen Überschwemmung verbunden ist.
- Die Erstellung der Intensitätskarten erfolgt prozessquellenbasiert. Dabei werden die Wirkungsflächen jeder Prozessquelle (jedes Baches) separat erfasst. Verschiedene Kantone verlangen zudem teilprozessspezifische Intensitätskarten für Überschwemmung (mit und ohne Übersarung) und Murgangprozesse.
- Ein spezielles Augenmerk ist auf Prozessquellen mit Ursprung ausserhalb des Untersuchungsperimeters zu richten, welche eine Einwirkung auf den Untersuchungsperimeter ausüben können.

- Bereits frühzeitig ist mit dem Auftraggeber abzuklären, für welchen Bereich (z.B. Siedlungsraum, Erfassungsbereich, Perimeter A, etc.) Intensitätskarten zu erstellen sind.

Tabelle 3: Intensitätsklassen nach Prozessart (BWW, BRP & BUWAL, 1997[12])

Intensität	Kriterien bei Überschwemmung	Kriterien bei Ufererosion	Kriterien bei Übermurung
stark	h > 2 m oder v * h > 2 m²/s	d > 2 m	h > 1 m **und** v > 1 m/s
mittel	2 > h < 0.5 m oder 2 m²/s > v * h > 0.5 m²/s	2 m > d > 0.5 m	h < 1 m oder v < 1 m/s
schwach	h < 0.5 m oder v * h < 0.5 m²/s	d < 0.5	keine
	h =Wassertiefe v = Fliessgeschwindigkeit des Wassers	d = mittlere Mächtigkeit der Abtragung (gemessen senkrecht zur Böschungsoberkannte	h = Mächtigkeit der Murgangablagerung v = Fliessgeschwindigkeit des Murgangs

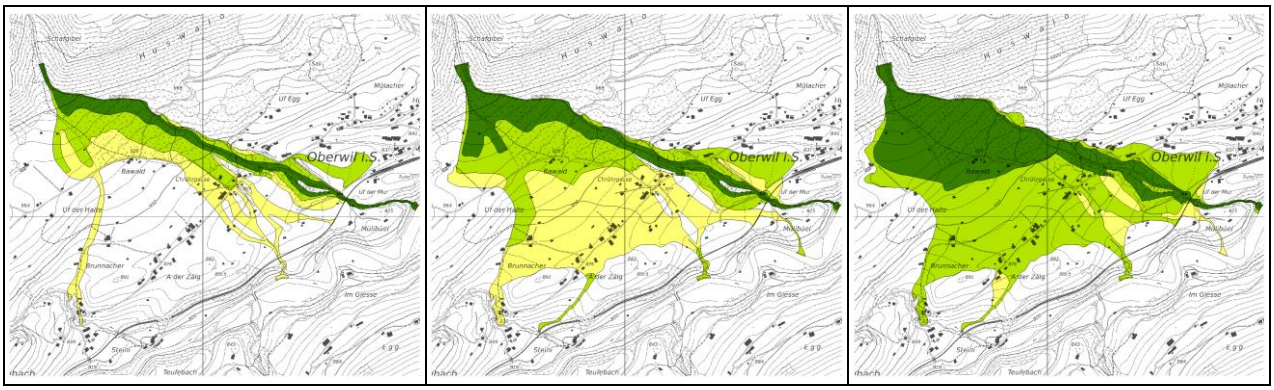


Abbildung 6: Intensitätskarten für die Wahrscheinlichkeitsklassen 0-30 Jahre (Bild links), 30-100 Jahre (Bild mitte) und 100-300 Jahre (Bild rechts).

4.11 Überprüfung im Gelände

Die Plausibilität der erarbeiteten Intensitätskarten ist im Gelände zu überprüfen und allenfalls anzupassen.

Die Erstellung der Intensitätskarte erfolgt teils im Gelände, teils durch Simulationen oder Auswertungen der Terraindaten. In jedem Fall sind die Resultate nach Erstellung der Entwürfe im Gelände zu plausibilisieren.

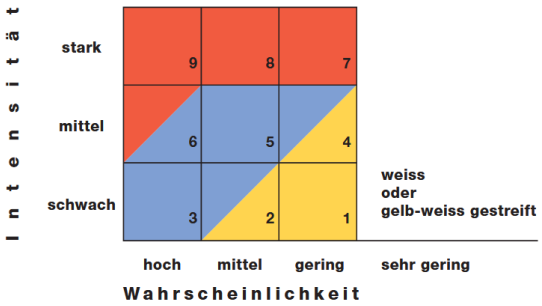
- Vergleich der Resultate mit der Kleintopographie (Hauptfliesswege, Abflusswege über Strassen, Hindernisse im Fliessweg wie Trottoir-Ränder, Gartenmauern, etc.).
- Beurteilung des Einflusses von Gebäuden auf die Fliessweg (Ablenkung, Bremswirkung).
- Beurteilung des Einflusses von Geschiebe- oder Schwemmholzablagerungen und -verklausungen auf die Fliesswege.

4.12 Erstellen der Gefahrenkarte (GK)

Auf der Grundlage der definitiven Intensitätskarten wird gemäss Gefahrenstufendiagramm die Gefahrenkarte erstellt.

- Durch Überlagerung der Intensitätskarten aller Eintretenswahrscheinlichkeiten werden die Intensitätskarten in die Gefahrenkarte überführt.

- Die Ausscheidung der Gefahrenstufen erfolgt nach den Vorgaben des Bundes (BWW, BRP & BUWAL, 1997, [12]). Unterschieden werden die Gefahrenstufen Rot (erhebliche Gefährdung), Blau (mittlere Gefährdung), Gelb (geringe Gefährdung) und Gelb-Weiss (Restgefährdung).



- Der Umgang mit den geteilten Feldern im Gefahrenstufendiagramm ist in den Bundesempfehlungen nicht explizit geregelt und ermöglicht es den Beurteilenden eine eigene begründete und nachvollziehbare Wahl zu treffen.

  In verschiedenen Kantonen bestehen jedoch Vorgaben bezüglich Zuweisung der geteilten Felder im Gefahrenstufendiagramm. Häufig ist bei den sogenannten 'brutalen Prozessen' die jeweils strengere Bewertung (rot statt blau, blau statt gelb) anzuwenden, bei den 'graduellen Prozessen' die schwächere Einstufung. Dabei gelten Murgangprozesse als brutale Prozesse und Überschwemmungen als graduelle Prozesse. Übersarungsprozesse gehören gemäss Bundesempfehlung zu den Überschwemmungsprozessen, können aufgrund ihrer heftigen Einwirkung aber ebenfalls zur Wahl der strengeren Bewertung führen. In diesen Fällen ist mit dem Auftraggeber die Einstufung abzuklären. In jedem Fall ist das Vorgehen zur Bewertung nachvollziehbar zu dokumentieren.

- In verschiedenen Kantonen erfolgt der Verschnitt der Intensitätskarten zur Gefahrenkarten durch kantonseigene GIS-Dienste. Dabei erfolgt unter anderem auch eine Prüfung der Topologie und der Datenmodell-Vorgaben.

4.13 Produkte der Gefahrenbeurteilung (Technischer Bericht, Dokumentation)

Die Erkenntnisse der Gefahrenbeurteilung sind sachlich richtig, nachvollziehbar und zielgruppenorientiert zusammenzufassen. Die Dokumentation soll für den Leser mit technischem Grundwissen ohne Rückfragen verständlich und nutzbar sein.

Die verwendeten Dokumente, sowie die Grundlagen für die Beurteilungen sind zusammenzufassen.

Technischer Bericht

- Aufbau und Inhaltsverzeichnis gemäss Absprache mit Auftraggeber (in den meisten Kantonen gibt es entsprechende Vorgaben).
- So kurz wie möglich, so umfangreich wie nötig. Allenfalls ist zwischen NaturgefahrenspezialistIn (Fachstellen) und Gemeindebehörde unterscheiden.
- Hinweise auf prozessspezifische Besonderheiten.
- Nachvollziehbarkeit: Erläuterung von Tatsachen und getroffenen Annahmen.
- Fotos aus dem Gelände helfen komplexe Inhalte einfacher zu begreifen.
- Wertung der Gefahrenkarte für Gemeinde und Sicherheitsdienste (Simulationen nicht gleich Realität, Hinweis auf Unsicherheiten und Unschärfen in der Beurteilung).
- Simulationsresultate, Übersichtspläne, etc. im Anhang platzieren.

Faktenblätter

Mithilfe von Faktenblättern können die wesentlichen Inhalte der Gefahrenbeurteilung pro Prozessquelle in einem Prozessdatenblatt (Faktenblatt) übersichtlich und einheitlich zusammengefasst werden. Bei kleinen, gleichartigen Prozessquellen kann ein Faktenblatt für mehrere Prozessquellen erstellt werden.

Tabelle 4: Minimaler Inhalt eines Faktenblattes pro Prozessquelle

Prozessquelle	Bachname
Charakteristik	- Kartenausschnitt (LK25, UP10) mit Situation - Angaben zu den wichtigsten Kenngrössen wie Einzugsgebietsgrösse, relevante/berücksichtigte Gerinnelänge, Vergletscherungsanteil - Beschreibung des Einzugsgebietes bezüglich Relief, Geologie, Gerinnezustand (Lockermaterial, Felsstrecken, Flachstrecken, etc.), Rutschaktivität in den Einhängen usw.
Ereigniskataster	- Datum und Kurzbeschreibung des Ereignisses (Auslösung, Prozess, Schwachstellen, betroffene Gebiete)
Schutzmassnahmen	- Beschreibung vorhandener Schutzmassnahmen und Einschätzung der Wirkung - Baujahr - Zustand und Wirksamkeit (nach PROTECT)
Wirksame Prozesse	- Aufzählung von Begleitprozessen, welche ebenfalls auf das Gerinne einwirken können (Rutschungen, Sturzprozesse, Lawinenablagerungen, etc.)
Niederschlag	- Niederschlagswerte mit Angabe der Quelle (HADES, Extremniederschlags-Statistik Meteoschweiz, weitere)
Abfluss - Szenarien	- Resultate der Abflussberechnungen, mit Angabe zur verwendeten Berechnungsmethode - Es ist zwingend anzugeben, für welche Stelle im Gerinne die Resultate gelten.
Geschiebe - Szenarien	- Resultate der Geschiebeabschätzungen, mit Angabe zur verwendeten Erhebungsmethodik - Angaben, ob es sich um Potenziale oder Frachten handelt. Werden Frachten ausgewiesen, sind ebenfalls die Verluste durch Ausuferung, Ablagerung, usw. zu beziffern. - Wenn massgebend Angaben zur Transportkapazität - Es ist zwingend anzugeben, für welche Stelle im Gerinne die Resultate gelten.
Schwemmholz - Szenarien	- Resultate der Schwemmholzabschätzungen, mit Angaben zur verwendeten Erhebungsmethodik und für welche Stelle die Angaben gelten
Schwachstellen	- Zusammenstellung der Schwachstellen mit Angabe zu Geometrie (Dimensionen, Sohlengefälle), evtl. Durchflusskapazität und Methode der Kapazitätsberechnung, kapazitätsreduzierende Faktoren - Berücksichtigung Freibord ja/nein, Berechnungsansatz
Wirkungsanalyse (IK, GK)	- Pro Szenario (z.B. 30 J.) Beschreibung des Prozessablaufes, Schwachstellen, betroffene Fläche, Intensitäten, Auswirkungen und Konfliktpotential.
Fotos	- Charakteristische Bilder zu Einzugsgebiet, Gerinne, Schwachstellen, Schutzbauten, Hindernissen, Fliesswegen, etc.
Bearbeiter/in, Datum	- Büro, Name Bearbeiter/in, Datum

5 Berechnungsansätze und Formeln

Die in der Gefahrenbeurteilung von Wildbachprozessen gebräuchlichsten Formeln sind in den nachfolgenden Abschnitten zusammengestellt. Die Zusammenstellung ist nicht abschliessend. Detaillierte Angaben zu den Berechnungsanasätzen sind den aufgeführten Referenzen zu entnehmen.

Transportprozesse spielen bei der Verlagerung von Wasser und Geschiebe in Wildbächen eine entscheidende Rolle. Unterschieden werden grundsätzlich vier Transportprozesse:

- Reinwasserabfluss
- Fluvialer Geschiebetransport
- Murgangartiger Feststofftransport
- Murgänge

Bei der Verwendung der aufgeführten Transportformeln ist zu beachten, dass diese nur für begrenzte Gerinnegefälle anwendbar sind. Zudem sind gemäss [39] die reinen Transportkapazitätsformeln eher für Murgänge und murgangartige Transportprozesse gültig, während Formeln mit Berücksichtigung von Energieverlusten fluvialen Geschiebetransport repräsentieren.

5.1 Reinwasserabfluss

Reinwasserabflüsse treten in Wildbächen während Hochwasserereignissen in Reinform nicht auf. Die Bestimmung der Abflussmengen bildet jedoch die Grundlage für die Abschätzung der transportierten Geschiebemengen und die Auslösung von Murgängen.

Für die Bestimmung der Abflussmengen einer bestimmten Auftretenswahrscheinlichkeit sind neben den naturräumlichen Gegebenheiten wie Einzugsgebietsgrösse, Gerinnelänge, Bodeneigenschaften, insbesondere Angaben zu Niederschlagsmengen und -intensitäten notwendig.

5.1.1 Niederschlag

Informationen zu Niederschlagsdaten können den folgenden Quellen entnommen werden:

- Hydrologischer Atlas der Schweiz, HADES, www.hydrologischeratlas.ch [24]
- Daten von Messstationen (Meteoschweiz, kantonale Stationen, private Messstationen, etc.)
- Zeller, J. Geiger, H. und Röthlisberger, G (1979): Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes (enthält Angaben zur Periode 1901 - 1970) [22]
- Extremwertanalysen, www. klima-extreme.ch (Periode 1966 - 2015) [28]

5.1.2 Hydrologie und Abfluss

Die Hydrologie befasst sich im Zusammenhang mit Hochwasserprozessen mit Abflussspitzen und Abflussvolumen.

Übersichtliche Zusammenstellungen und Beschreibungen der am häufigsten verwendeten Methoden zur Bestimmung der hydrologischen Kenngrössen findet sich in BWG (2002) [10] und Optimeth [42]. Darin werden drei Methodengruppen unterschieden:

a) Statistische Ansätze (basierend auf Pegelstatistik)

b) Niederschlags- Abflussmodelle (N-A-Modelle)

c) Hüllkurven -Verfahren

Die nachfolgenden Tabellen wurden aus Optimeth [42] übernommen und leicht angepasst.

Tabelle 5: Gruppierung der Methoden Hydrologie (aus: Optimeth [42])

	Art des Ergebnisses	**erforderliche Abfluss-/Niederschlagsdaten**	**Qualität der Ergebnisse**
Statistische Ansätze (mit Pegel im EZG)	Abflusswert mit Jährlichkeit; keine Ganglinie	lange Abflussmessreihen im EZG	hoch ↓ gering
Statistische Ansätze (ohne Pegel im EZG)	Abflusswert mit Jährlichkeit; keine Ganglinie	lange Abflussmessreihen in Referenzgebieten	
aufwendigere N-A-Modelle	Abflusswert mit Jährlichkeit und Ganglinie	Niederschlagsdaten; Abflussmessungen zur Modellkalibrierung	
einfache N-A-Modelle	Abflusswert mit Jährlichkeit; keine Ganglinie	Niederschlagsdaten; Abflussmessungen zur Modellkalibrierung	
Hüllkurven	Abflusswert i.d.R. ohne Jährlichkeit; keine Ganglinie	keine	

Tabelle 6: Überblick über die meistverwendeten Methoden Hydrologie (aus: Optimeth [42])

	Verfahren / Modell / Programm	**Abflusswert**	**HQ_T ***	**Ganglinie**
Statistik	Statistische Auswertung des HQT aus Pegelwerten (**Pegelstatistik**)	x	x	
	Modell **BaD7** (Softwarepaket HQx-meso_CH)	x	x	
	Modell **Momente** (Softwarepaket HQx-meso_CH)	x	x	
N-A - Modelle	Modell **HecHMS** (Einheitsganglinienverfahren, SCS)	x	x	x
	Modell **IHK-HW** (Einheitsganglinienverfahren, Lutz)	x	x	x
	Programm **ZEMO-KOST** (Laufzeitverfahren)	x	x	x
	Programm **EGLSYN** (Einheitsganglinienverfahren, SCS)	x	x	x
	EGL-X: Flächendetailliertes NA-Modell auf Excel-Basis	x	x	x
	Verfahren **ClarkWSL** (Softwarepaket HAKESCH)	x	x	x
	Verfahren nach Kölla **"Kölla meso"** (Softwarepaket HQx_meso_CH)	x	x	
	Modifiziertes Fließzeitverfahren (Softwarepaket HAKESCH)	x	x	
	Verfahren nach **Taubmann / Thiess / Chow** (Softwarepaket HAKESCH)	x	x	
Hüllkurven	**Verfahren nach** Wundt	x		
	Modell **GIUB'96 Regionalisierung** (Softwarepaket HQx_meso_CH)	x	x	
	Verfahren nach **Kürsteiner** (Softwarepaket HQx_meso_CH)	x		
	Verfahren nach **Müller-Zeller** (Softwarepaket HQx_meso_CH)	x		

* HQT = Es kann ein Abflusswert einer konkreten Jährlichkeit ermittelt werden

5.1.3 Hydraulik

Die Hydraulik befasst sich mit dem Strömungsverhalten es Wassers. Mittels hydraulischer Berechnungen kann die Abflusskapazität eines Gewässers und Wasserspiegellagen für Hochwasserereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit bestimmt werden. In stark geschiebeführenden Wildbächen spielen diese Prozesse eine untergeordnete Rolle.

Eine Zusammenstellung der wichtigsten Formeln und Berechnungsmodelle zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Überblick Methoden Hochwasserabfluss (aus: Optimeth [42], angepasst)

	Methode	Ziel der Methode
Formeln	"**Fliessformeln**": Formeln zur Berechnung des Fliesswiderstandes und der Energieverluste in steilen Gerinnen	Berechnung der Fliessgeschwindigkeiten, Reibungskoeffizient
1D	HEC-RAS	Ermittlung von Überschwemmungsgebieten und Überschwemmungsgrenzen, Bemessungshilfe für Hochwasserschutz- und Renaturierungsmaßnahmen, Nachweis von Auswirkungen von Baumaßnahmen im und am Gewässer, Beurteilung der ökologischen Standortbedingungen, Untersuchung hoch instationärer Ereignisse (z.B. Dammbruch). Gültigkeitsbereich bis max. 10% Gefälle
	WSP-Win	Ermittlung von Wasserspiegellagen, Fließgeschwindigkeiten und Fließzuständen für stationär-ungleichförmige Abflüsse. Berechnungen auf den Unterlauf von Wildbächen beschränkt.
2D	FLUMEN	Ermittlung von Überflutungsflächen, Überflutungsgrenzen, Bemessungshilfe für Hochwasserschutzmaßnahmen, Hilfe für die Abgrenzung von Gefahrenzonen (Hochwasser), Untersuchung hoch instationärer Ereignisse (z.B. Dammbruch). Sedimenttransport, Murgang (2 Parameter Modell).
	FLO-2D	Ermittlung von Überflutungsflächen, Überflutungsgrenzen, Bemessungshilfe für Hochwasserschutzmaßnahmen, Hilfe für die Abgrenzung von Gefahrenzonen (Hochwasser), Untersuchung hoch instationärer Ereignisse (z.B. Dammbruch). Kombinierte Niederschlags-Abflussberechnung, Sedimenttransport, Murgang
	Hydro_AS-2D	Ermittlung von Überschwemmungsgebieten und Überschwemmungsgrenzen, Bemessungshilfe für Hochwasserschutz- und Renaturierungsmassnahmen, Nachweis von Auswirkungen von Baumaßnahmen im und am Gewässer, Beurteilung der ökologischen Standortbedingungen, Untersuchung hoch instationärer Ereignisse (z.B. Dammbruch).

5.2 Fluvialer Geschiebetransport

Bei fluvialem Feststofftransport spielen neben der Abflussmenge auch Fliesswiderstand, Fliessgeschwindigkeit, Korngrösse und Kornzusammensetzung eine wichtige Rolle.

5.2.1 Bestimmung von Abflussmenge

Die Berechnung der Abflussmengen kann mit den in Kapitel 5.1.2 aufgeführten Ansätzen durchgeführt werden.

5.2.2 Fliesswiderstand und Fliessgeschwindigkeit

Für die Berechnung der Fliessgeschwindigkeiten stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Allen Ansätzen ist gemeinsam, dass sie von der Gerinneneigung abhängig sind, wobei mit zunehmender Gerinneneigung das Widerstandsverhalten ändert.

Wichtig bei der Anwendung der Formeln ist eine kritische Prüfung der Resultate auf Plausibilität.

Berechnung nach GAUKLER-MANNING-STRICKLER (Strickler-Formel)

- *Strickler, A., 1923: Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauhigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen, Mitt. d. Amtes f. Wasserwirtsch. Nr. 16, Bern: 46.*
- *BWG, 2001: Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fliessgewässern. Berichte des BWG, Serie Wasser, Nr. 1, Bern; http://www.bwg.admin.ch/service/katalog/download/804501d.pdf*
- *Rickenmann, D., 2014: Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. WSL Berichte, Heft 9, 2014.*

$$v_m = k_{st} \times R^{2/3} \times J^{1/2} \qquad \textit{(Formel 1)}$$

v_m	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Wassers	[m/s]
k_{st}	Rauheitsbeiwert	[$m^{1/3}/s$]
R	Mittlerer hydraulischer Radius R = F/U mit F = Strömungsquerschnitt und U = benetzter Umfang	[m]
J	Gefälle (Tangens des Gefällswinkels)	[m/m]

Der Anwendungsbereich der Stricklerformel beschränkt sich grundsätzlich auf Gerinne mit einem Gefälle zwischen 0.2 – 4 % und eignet sich daher für Wildbäche nur beschränkt. In der Praxis wird in steilen Gerinnen aber dennoch häufig mit diesem Ansatz gearbeitet. Die zu hohen Fliessgeschwindigkeiten, welche sich aus der Formel ergeben werden durch die Wahl eines niedrigen Rauheitsbeiwertes kompensiert.

Strickler-Koeffizienten k_{St} nach Zeller &Trümpler (1984):

	k_{St} [$m^{1/3}/s$]
Wildbäche	
Grobkiessohle mit Steinen, gerade	20 - 25
Grobkiessohle mit Steinen, gewunden	15 - 20
Steinsohle mit einzelnen Blöcken, gerade	12 - 17
Blocksohle, Schnellen-Becken, unregelmässig	8 - 15
Blocksohle, Schnellen-Becken, unregelmässig, verwachsen	5 - 12
Gebirgsflüsse	
Kies- und Steinsohle, gerade	20 - 33
Steinsohle mit Blöcken, gerade	14 - 25
Blocksohle, gerade	10 - 15

Berechnung nach Smart und Jäggi

- *Smart, G.M., Jaeggi, M.N.R., 1983: Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 64. Zürich: S.71.*

Gültig für Gerinne J < 0.02:

$$v_m = 2.5 \times (g \times h_m \times J)^{0.5} \times (1 - e^{\left(\frac{0.05 Z_{90}}{J^{0.5}}\right)})^{0.5} \times \ln 8.2 \times Z_{90} \qquad \textit{(Formel 2)}$$

v_m	Mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Wassers	[m/s]
g	Erdbeschleunigung (9.81 m/s^2)	[m/s^2]
h_m	Mittlere Abflusstiefe des Wasser-Feststoffgemisches	[m]
J	Gefälle (Tangens des Gefällswinkels)	[m/m]
E	Basis des natürlichen Logarithmus	[m^2]
$Z_{90}=h_m/d_{90}$	d90 = jener Durchmesser, bei dem 90% der Menge kleiner sind	[m]

Berechnung nach Rickenmann (1996)

- *Rickenmann, D., 1996: Fliessgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. "wasser, energie, luft, 88. Jg, Heft 11/12:298 - 304, Baden.*

$$v = \frac{0.37 g^{0.33} Q^{0.34} J^{0.20}}{d_{90}^{0.35}}$$ gültig für J > 0.6% *(Formel 3)*

$$v = \frac{0.96 g^{0.36} Q^{0.29} J^{0.35}}{d_{90}^{0.23}}$$ gültig für J < 1% *(Formel 4)*

Bereiche der Parameter der Messdaten, welche für die Herleitung der empirischen Gleichungen verwendet worden sind.				
	J [%]	Q [m^3/s]	d_{90} [m]	H/d_{90}
Für J > 0.6%	0.8 - 63	0.03 - 140	0.05 - 2.1	0.4 - 4
Für J < 1%	0.0085 - 0.8	0.3 - 2400	0.03 - 0.81	1 - 100

J	Gefälle	[%]
g	Erdbeschleunigung (9.81 m/s^2)	[m/s^2]
Q	Abfluss	[m^3/s]
d_{90}	d_{90} = jener Durchmesser, bei dem 90% der Menge kleiner sind	[m]

Berechnung nach Hodel

- *Hodel, H.P., 1993: Untersuchung zur Geomorphologie, der Rauheit des Strömungswiderstandes und des Fliessvorgangs in Bergbächen. Diss. ETHZ.*

$$v_r = 0.19 \times \left(\frac{Q}{Q_x \times J^{0.5}}\right)^{0.64}$$ gültig für Wildbachstrecken ohne ausgeprägte Kaskadierung *(Formel 5)*

$$v_r = 0.46 \times \left(\frac{Q}{Q_x \times J^{0.5}}\right)^{0.63}$$ gültig für sehr steile Wildbachstrecken mit ausgeprägter Kaskadierung *(Formel 6)*

J	Gefälle (Tangens des Gefällswinkels)		[m/m]
Q	Abfluss		[m^3/s]
Q_x	Bezugswassermenge:		[m^3/s]
	Lage der Wildbäche	Charakt. Korn∅ (d_{70})	Bezugswassermenge
	Alpine Bergbäche		Q_{91}
	Voralpine Bergbäche	< 0.1 m	Q_{60}
	Voralpine Bergbäche	> 0.1 m	Q_{40}

5.2.3 Korngrössen und Kornzusammensetzung

Der Transport von Feststoffen in einem Wildbach ist abhängig von der Korngrössenzusammensetzung des Geschiebes im Gerinne. In den Geschiebetransportrechnungen wie auch bei der Berechnung des Fliesswiderstandes sind Angaben zu Korngrössen notwendig. Diese können mittels Volumenanalyse oder Oberflächenanalyse (Linienzahlanalyse) ermittelt werden.

Bei der **Volumenanalyse** wird mittels Siebung und Gewichtsermittlung einer bestimmten Sedimentmenge aus dem Gerinne die Kornverteilung ermittelt. Bei der **Oberflächenanalyse** erfolgt die Ermittlung der Kornverteilung im Gelände durch visuelle Ansprache.

Beschreibungen der beiden Methoden sind in Fehr (1986 [16], 1987a [17], 1987 b[18]) sowie in Bunte & Abt (2001,[13]) zu finden.

5.2.4 Berechnung des Geschiebetransportes und der Geschiebefrachten

Für die Berechnung des Geschiebetransportes stehen zahlreiche Berechnungsansätze zur Verfügung. In der Schweiz am gebräuchlichsten sind die nachfolgend aufgeführten Ansätze nach Smart & Jäggi (1983) und nach Rickenmann (1990). Weitere Ansätze sind in Rickenmann (2014), [39] beschrieben.

- *Smart, G.M., Jaeggi, M.N.R., 1983: Sedimenttransport in steilen Gerinnen. Mitt. der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie Nr. 64. Zürich: S.81*

$$q_b = \frac{4}{s-1} \times \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2} \times q \times J^{1.6} \times \left(1 - \frac{\theta_{cr} \times (s-1) \times d_m}{h_m \times J}\right) \qquad \textit{(Formel 7)}$$

q_b	spezifische Feststofftransportrate (reines Feststoffvolumen pro Zeit- und Breiteneinheit	[m³/sm]
s	relative Dichte des Feststoffes zum Wasser ($\rho_{fest}/\rho_{Wasser}$)	[-]
d_{90}, d_{50}, d_{30}	charakteristische Korngrössen (dx = x% des Sohlenmaterials sind kleiner)	[m]
q	spezifischer Reinwasser-Abfluss pro Meter Gerinnebreite	[m³/sm]
J	Sohlengefälle	[m/m]
θ_{cr}	kritscher Shiedsfaktor bei Transportbeginn (kann mit 0.05 angenommen werden)	[-]
d_m	mittlere Korngrösse (entspricht etwa de d50)	[m]
h_m	Höhe des Feststoff-Wassergemisches	[m]

Geschiebetransport nach RICKENMANN(1990) für Gerinne mit J < 0.2

- *Rickenmann, D., 1990: Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes, Mitt. d. VAW / ETH Zürich Nr. 103.*
- *Rickenmann, D., 2001: Comparison of bed load transport in torrents and gravel bed streams.Water Resources Reserch,37, 3295 - 3305.*

Schritt 1: Berechnung des kritischen Abflusses qcr bei Transportbeginn:

$$q_{cr} = 0.065 \times (s-1)^{1.67} \times g^{0.5} \times {d_{50}}^{1.5} \times J^{-1.12} \qquad \textit{(Formel 8)}$$

Schritt 2: Berechnung der spezifischen Geschiebetransportrate (reines Geschiebevolumen pro Zeit- und Meter Gerinnebreite):

$$q_b = \frac{12.6}{(s-1)^{1.6}} \times \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0.2} \times (q - q_{cr}) \times J^{2.0} \qquad \textit{(Formel 9)}$$

q_b	spezifische Feststofftransportrate (reines Feststoffvolumen pro Zeit- und Breiteneinheit	[m³/sm]
s	relative Dichte des Feststoffes zum Wasser ($\rho_{fest}/\rho_{Wasser}$)	[-]
d_{90}, d_{50}, d_{30}	charakteristische Korngrössen (dx = x% des Sohlenmaterials sind kleiner)	[m]
q	spezifischer Reinwasser-Abfluss pro Meter Gerinnebreite	[m³/sm]
J	Sohlengefälle	[tm/m]
q_{cr}	kritischer Abfluss bei Transportbeginn	[m³/sm]

5.2.5 Simulationsmodelle für Geschiebetransport

Bis heute bestehen für Wildbäche nur wenige numerische Geschiebetransportmodelle. Eine Auswahl davon sind in Tabelle 8 aufgeführt. Beschreibungen zu Einsatzzweck und Anwendung sind den jeweiligen Dokumentationen zu entnehmen.

Die Modelle beschränken sich auf die Modellierung von Transportprozessen. Für die Simulation von Geschiebeablagerungen auf Wildbachkegeln bestehen heute nur wenige Modellansätze.

Tabelle 8: Zusammenstellung numerischer Simulationsmodelle für den Geschiebetransport in Wildbächen und Wildflüssen (Auswahl)

Modell	Autor	Referenz
Modelle für Wildbäche:		
SHESED	WICKS & BATHURST 1996	WICKS, J.M., BATHURST, J.C. (1996): SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system. Journal of Hydrology, 175, 213–238.
ETC	MATHYS et al. 2003	MATHYS, N., BROCHOT, S., MEUNIER, M., RICHARD, D. (2003): Erosion quantification in the small marly experimental catchments of Draix (Alpes de Haute Provence, France): Calibration of the ETC rainfall-runoff-erosion model. Catena, 50, 527–548.
SETRAC	RICKENMANN et al. 2006a	RICKENMANN, CHIARI, M., FRIEDL, K. (2006a): SETRAC – A sediment routing model for steep torrent channels. In R. Ferreira, E. Alves, J. Leal & A. Cardoso (eds), River Flow 2006, pp. 843–852. London: Taylor & Francis.
TomSED	Rickenmann & Recking (2011)	Rickenmann, D., Recking A. (2011): Evaluation of flow resistance in gravel-bed streams through a large field data set. Water Resources Research, 47, W07538.
PROMAB	RINDERER et al. 2009	RINDERER, M., JENEWEIN, S., SENFTER, S., RICKENMANN, D., SCHÖBERL, F., STÖTTER, J., HEGG, C. (2009): Runoff and bedload transport modelling for flood hazard assessment in small alpine catchments – the model PROMAB-GIS. In E. Veulliet, J. Stötter & H. Weck-Hannemann (eds),
Modelle für Gebirgsflüsse:		
MORMO	SCHILLING & HUNZIKER 1995	SCHILLING, M., HUNZIKER, R. (1995): Programmpaket MORMO – Grundlagen. In: Mathematische Modelle offener Gerinne, ÖWAV-Seminar Konstruktiver Wasserbau – Landschaftswasserbau, 21. Nov. 1995, Bd. 17, pp. 91–104
BASEMENT	VETSCH et al. 2005	VETSCH, D., FÄH, R., FAHRSI, D., MÜLLER, R. (2005): BASEMENT – Ein objektorientiertes Software-system zur numerischen Simulation von Naturgefahren. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 190, p. 201–212
sedFlow	Rickenmann et al. 2014	Rickenmann, D.; Böckli, M.; Heimann, F.U.M.; Badoux, A.; Turowski, J.M., 2015: Das Modell sedFlow und Erfahrungen aus Simulationen des Geschiebetransportes in fünf Gebirgsflüssen der Schweiz. Synthesebericht. WSL Berichte, 24. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 68 p.

5.3 Murgang

- *Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O., Hunziker, G, 1997a: Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, Verlag der Fachvereine, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz, 161p.*
- *Rickenmann, D., 2014: Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen.*

5.3.1 Murfähigkeit

Die wichtigsten Faktoren für die Entstehung von Murgängen sind ein minimales Bachgefälle und die Verfügbarkeit von Geschiebe. Das Mindestgefälle für die Auslösung beträgt zwischen 25 – 30 %. Sind Förderfaktoren wie Engstellen, Schwemmholz, etc. vorhanden, können bereits bei 15 – 25 % Gerinneneigung Murgänge auftreten.

5.3.2 Murgangauslösung

Die Auslösung von Murgängen ist abhängig vom Vorhandensein von Wasser im Lockermaterial. Oft spielen auch Rutschungen eine wichtige Rolle bei der Auslösung. Neben der Niederschlagsintensität ist vor allem die Wassersättigung des Bodens relevant. Die Disposition zu Murgängen steigt mit zunehmender Wassersättigung des Bodens. Die Bereitstellung des Wassers kann sowohl durch Gewitterniederschläge als auch durch Dauerregen oder Schneeschmelze erfolgen. Generell gilt, dass eine minimale Niederschlagsintensität von rund 30 mm/h und eine minimale Niederschlagssumme von rund 40 mm notwendig sind, um Murgänge auszulösen.

- Kritischer **Niederschlag** nach Zimmermann (1997), gültig für die Schweiz:

$$I = 43 \times {D_N}^{-0.89}$$

I	mittlere Regenintensität [mm/Std.]	*(Formel 10)*
D_N	Regendauer [Std.]	

- Kritische **Gerinneneigung** nach Zimmermann (1997):

$$J_{Start} = 0.32 \times EG^{-0.2}$$

J_{Start}	Gefälle [m/m] im Anrissbereich	*(Formel 11)*
EG	Einzugsgebietsgrösse [km²]	

- Kritischer **Abfluss**:

$$q_c^* = q_c/(g^{0.5} \times D^{1.5})$$

q_c^*	krit. Dimensionsloser Abfluss für Murgang-entstehung [m³/s]	*(Formel 12)*
q_c	krit. spezifischer Abfluss pro m Gerinnebreite [m³/s]	
D	charakteristische Korngrösse des Gerinnebettes [m]	
g	Erdbeschleunigung, 9.81 [m/s²]	

5.3.3 Murgangfracht

Es gibt verschiedene empirische Schätzverfahren zur Berechnung der Murgangfracht. Diese Verfahren geben eine Grössenordnung der Kubatur an. Da es sich teilweise um stark vereinfachte Berechnungsansätze handelt, welche die lokalen Gegebenheiten nur ungenügend widerspiegeln, sind Abweichungen um einen Faktor 5 bis 10 möglich.

Zuverlässige Ergebnisse mit Einbezug lokalen Gegebenheiten (Verfügbarkeit von Lockermaterial, Felsstrecken, Flachstrecken mit limitierendem Charakter, Eintragsprozesse aus den Gerinneeinhängen, Engnisse, usw.) können nur im Gelände in genügender Qualität erhoben werden.

Mit den empirischen Schätzverfahren können aber als grobe Überprüfung der Resultate aus den Geländeaufnahmen verwendet werden:

- **Empirische Abschätzverfahren**

Tabelle 9: Überblick über die meistverwendeten Methoden zur Bestimmung des Geschiebepotenzials (aus: Zimmermann (1998) [51])

Autor	Formel	Bezeichnungen	Hinweise
Kronfellner-Kraus (1982)	$V = K \times E \times J_c$ *(Formel 13)*	V = Murenfracht [m3] K = Koeffizient [-] E = Einzugsgebietsgrösse [km2] Jc = Neigung des Hauptgerinnes [%]	„Niedrige K-Werte (um 500) gelten für grosse, ausgeräumte, gut bewachsene Einzugsgebiete (EZG), hohe K-Werte (um 1500) für steile, kleine und mittlere EZG mit ausgedehnten Geschiebeherden und geringem oder anfälligem Bodenschutz.“ Rechnerischer Ansatz zur Bestimmung von K: $K = 1750/e^{0.018*E}$
Zeller (1985)	$V = K \times E^{0.78}$ *(Formel 14)*	K = Koeffizient [-] E = Einzugsgebietsgrösse [km2]	Koeffizient K liegt im Bereich zwischen 17'000 - 27'000
D'Agostino Nr. 1 (1996)	$V = 45 * E^{0.9} * Jc^{1.5} * IG$ *(Formel 15)*	E = Einzugsgebietsgrösse [km2] Jc = Neigung des Hauptgerinnes [%] IG = Geologiefaktor [-]	IG = 5 bei Moränenbedeckung, Schotter, Rutschungsmassen IG = 4 bei Metamorphiten wie Phyllite, Schiefer IG = 3 bei Klastischen Gesteinen wie Mergel, Sandsteine IG = 2 bei Basalttuff, Breckzien, verwitterte Lavagesteine IG = 1 bei Kalksteinen IG = 0 bei Porphyren, Granite, Diorite
D'Agostino Nr. 2 (1996)	$V = 39 * E * Jc^{1.5} * IG * IT^{-0.3}$ *(Formel 16)*	E = Einzugsgebietsgrösse [km2] Jc = Neigung des Hauptgerinnes [%] IG = Geologiefaktor [-]	IT = 1 für Murgang IT = 2 für murgangähnlichen Geschiebetrieb IT = 3 für fluvialen Geschiebetrieb
Hampel (1980)	$V = \frac{4.47 \times E \times H_{100} \times \Psi \times \frac{H_u}{(1-2300)} \times (J-1.23)^{2.63}}{J \times s^l}$ *(Formel 17)*		E = Einzugsgebietsgrösse [km²] H_{100} = 100 j. 24-Std. Niederschlag [mm] Ψ = Abflussbeiwert [-] Hu = Höhe der Mündung J = Schwemmkegelgefälle [%] s = Abriebskoeffizient l = Lauflänge Gerinne zwischen Quelle und Schwemmkegel
Rickenmann (1995)	M = (6.4* J_K - 23) * L M = (110 - 2.5 J_K) * L *(Formel 18, 19)*	M = Murenfracht [m3] J_K = Kegelgefälle [%] L = Gerinnelänge zwischen Anrisspunkt und unterstem Ablagerungspunkt	für 7% < J_K < 15% für 15% < J_K < 40%

- **Abschätzverfahren basierend auf Geländeaufnahmen:** Es bestehen verschiedene Verfahren, zur Erfassung und Beurteilung des Geschiebepotenzials sowie der Geschiebefrachten in Wildbächen:

Tabelle 10: Zusammenstellung der Abschätzverfahren basierend auf Geländeaufnahmen (Auswahl

Methode	Inhalt
Lehmann *Spreafico et al., 1996: Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. [46]*	Die Methode basiert auf den Untersuchungen zu den Unwettern 1987. Das Verfahren beschreibt das Vorgehen von der Grundlagenerfassung über die Feldaufnahmen bis zur Auswertung der Feldaufnahmen. Behandelt werden sämtliche Prozesse von Fluvialem Geschiebetrieb bis zu Murgangprozessen.
SEDEX *Frick, E., Kienholz, H., Romang, H. (2011): SEDEX Anwenderhandbuch. GEOGRAPHICA BERNENSIA, p 42, Bern. [20]*	SEDEX ist ein Instrument für die nachvollziehbare Herleitung von Geschiebeszenarien basierend auf Geländearbeit in Wildbachgerinnen. Der Detaillierungsgrad kann je nach Fragestellung angepasst werden.
GERTSCH *Gertsch, E. (2009): Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen - Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Dissertation.* Gertsch, E. (2009): Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen - Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Dissertation.*[23]*	Die Methode basiert auf einer Excel-basierten Geschiebeabschätzung, bietet aber auch die Möglichkeit zusätzliche Informationen aus Geländeaufnahmen einzubeziehen.
ETAlp - Geschiebepotenzialband *Angerer H., Pitracher M., Schiegg H.O., Mayer R. (2003): ETAlp - Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten. ETAlp-Handbücher und Kompendien, WLV und BMLW 2003. [2]*	Das Verfahren basiert auf einer abschnittsweisen Bestimmung der relevanten Prozessparameter und der Zuordnung von Transportprozessen pro Abschnitt. Als Resultat liegen Geschiebebilanzen und Geschiebefrachten pro Gerinneabschnitt vor.

- **GIS-basierte Abschätzverfahren**

Unter GIS-basierten Abschätzverfahren zur Bestimmung von Geschiebefrachten werden Ansätze verstanden, bei denen ein Grossteil der relevanten Parameter aus digital verfügbaren Raumdaten abgeleitet wird. Diese Verfahren haben den Vorteil eines vergleichsweise geringen Bearbeitungsaufwandes. Demgegenüber stehen aber grössere Einbussen bei der Aussagegenauigkeit, da die verwendeten Grundlagendaten häufig die Realität nur ungenau wiedergeben können. Das Verfahren Gertsch (2009) trägt diesem Umstand Rechnung, indem sowohl eine vollständig schreibtischbasierte Bearbeitung (geringe Bearbeitungstiefe) als auch eine feldergänzte Bearbeitung (hohe Bearbeitungstiefe) möglich ist.

Es stehen die beiden Verfahren Zimmermann et al. (1997) /Heinimann et al. (1998) und Gertsch (2009) zur Verfügung.

Tabelle 11: Zusammenstellung GIS-basierter Geschiebe-Abschätzverfahren (Auswahl)

Methode	Inhalt
ZIMMERMANN/HEINIMANN *Zimmermann et al. (1997): Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, Verlag der Fachvereine, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz, 161 p. [50]*	Der Ansatz von Zimmermann et al. basiert vollständig auf digitalen Datensätzen zur Topographie, zur Geologie und zur Bodenbedeckung. Das Modell berechnet ausgehend vom Gewässernetz die geschieberelevanten Flächen im Hang sowie im Gerinne. Nebst der Herleitung des Geschiebepotenzials liefert das Modell Angaben zu Transportprozessen sowie zu Ausbreitung und Reichweite auf dem Kegel. Die Aussagegenauigkeit bezieht sich auf die Hinweisstufe.
GERTSCH *Gertsch, E. (2009): Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei*	Die Methode Gertsch basiert auf der Analyse von Wildbachereignissen mit einer Wiederkehrperiode von ca. 100 Jahren. Diese bilden die Grundlage für ein Excel-basiertes Geschiebeabschätzverfahren. Der Detaillierungsgrad des Verfahrens

Methode	Inhalt
Grossereignissen - Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Dissertation.[23]	kann je nach Fragestellung angepasst werden. Das Verfahren verwendet als Grundlagen digitale Daten zur Topographie, Geologie und Bodenbedeckung. Es bietet die Möglichkeit, zusätzliche Informationen aus Geländeaufnahmen einzubeziehen und so die Aussagegenauigkeit zu verbessern.

5.3.4 Erosionsleistung von Murgängen

Die Erosionsleistung bezeichnet die Menge an Geschiebe, welche durch einen Murgang während eines Ereignisses in einem typischen Querschnitt und einer bestimmten Abschnittslänge im einheitlichen Querschnitt erodiert wird. Sie lässt sich mit folgenden Faustformeln überschlagsmässig bestimmen:

Erosionsleistung = Erosions-Querschnitt [m^2] x Abschnittslänge [m]

Der Erosions-Querschnitt ergibt sich aus der Erosionstiefe (TE) und der Erosionsbreite (B). Für eine grobe Abschätzung der Erosionstiefe, respektive für die Plausibilisierung der im Gelände erhobenen Werte, können die folgenden Faustformeln beigezogen werden:

$TE = 13 \times J$ (Formel VAW) *(Formel 20)*

$TE = 1.5 + 12.5 \times J$ (Formel Kronfellner) *(Formel 21)*

$B = 2\ bis\ 5 \times TE$ (Verhältnis Erosionsbreite zu Erosionstiefe liegt max. bei 2 bis 5:1) *(Formel 22)*

TE	Erosionstiefe	[m]
B	Erosionsbreite im Gerinne	[m]
J	Sohlengefälle	[m/m]

5.3.5 Berechnung des Maximalabfluss (Murgangabfluss)

- *Rickenmann, D., 2014: Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen.*
- *Mizuyama, T., Kobashi, S., Ou, G., 1992: Prediction of debris flow peak discharge. Proc. International Symposium Interpraevent, Bern, Switzerland, Bd. 4, pp. 99–108.*

Rickenmann und Mizuyama leiten eine Beziehung zwischen der Murgangfracht M [m^3] und dem Maximalabfluss (Q_P) her. Dabei wird unterschieden zwischen granularen und schlammstromartigen Murgängen:

$Q_P = 0.135 \times M^{0.78}$ gültig für **granulare** Murgänge *(Formel 23)*

$Q_P = 0.0188 \times M^{0.79}$ gültig für **schlammstromartige** Murgänge *(Formel 24)*

Q_P	Maximalabfluss Murgang	[m^3/s]
M	Murgangfracht	[m^3]

Rickenmann (2014, [39]) weist darauf hin, dass der Maximalabfluss eher mit dem Volumen des grössten Schubes korreliert als mit der gesamten Murgangfracht eines Ereignisses.

Die Murgangfracht muss im Gelände erhoben werden oder kann näherungsweise durch empirische Formeln berechnet werden. Dabei ist jedoch Vorsicht geboten, da die Formeln die lokalen Gegebenheiten meist nur ungenügend berücksichtigen.

5.3.6 Berechnung der Fliessgeschwindigkeit

- Rickenmann, D., 2014: Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen.

Die Fliessgeschwindigkeit bei Murgängen ist abhängig von deren Materialzusammensetzung (Korngrösse, Kornverteilung, Wassergehalt). Häufig sind Aussagen zur konkreten, während eines Ereignisses auftretenden, Murgangzusammensetzung schwierig, da bei schubartigen Murgängen die Konsistenz der Schübe ändern kann.

Für die Abschätzung der mittleren Fliessgeschwindigkeit bestehen zwei Gleichungen:

$v = 2.1 \times Q^{0.33} \times S^{0.33}$ Anwendung in natürlichen Gerinneabschnitten *(Formel 25)*

$v = k_{St} \times h^{0.67} \times S^{0.5}$ Anwendung in künstlichen, kanalisierten Abschnitten *(Formel 26)*

v	mittlere Fliessgeschwindigkeit	[m/s]
Q	Abfluss	[m^3/s]
S	Sohlengefälle im betrachteten Gerinneabschnitt	[m/m]
k_{St}	pseudo Strickler-Koeffizient	[$m^{1/3}/s$]
h	Abflusstiefe	[m]

5.3.7 Bestimmung der Reichweite und der Ablagerungslänge auf dem Kegel

- Rickenmann, D., 2014: Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen.

Untersuchungen zu den Unwetterereignissen von 1987 haben ergeben, dass Murgänge den Schwemmkegel nur erreichen, wenn ein minimales Pauschalgefälle von 19% nicht unterschritten wird. Dabei bezeichnet das Pauschalgefälle das mittlere Gefälle des gesamten Fliessweges von der Anrisszone bis zum untersten Ablagerungspunkt.

Die **Reichweite** von Murgängen kann mit folgenden Formeln näherungsweise abgeschätzt werden:

$L = 1.9 \times M^{0.16} \times {H_e}^{0.83}$ mittlere Reichweite *(Formel 27)*

$L_{max} = 5 \times M^{0.16} \times {H_e}^{0.83}$ maximale Reichweite *(Formel 28)*

L	mittlere Reichweite auf dem Kegel	[m]
L_{max}	maximale Reichweite auf dem Kegel	[m]
M	Murenfracht	[m^3]
H_e	Höhendifferenz zwischen oberstem Anrisspunkt und unterstem Ablagerungspunkt	[m]

Die **Ablagerungslänge auf dem Kegel** lässt sich mit folgendem Ansatz bestimmen:

$L_f = {A_v}^2 / G$ *(Formel 29)*

wobei: $A_v = V_u \times \cos(\beta_u - \beta) \times (1 + (g \times h_u \times \cos\beta_u)/(2 \times {V_u}^2)$ *(Formel 30)*

$G = g \times (S_R \times \cos\beta_u - \sin\beta)$ *(Formel 31)*

L_f	Ablagerungslänge auf dem Kegel	[m]
A_v	Faktor (Zähler) für die Länge der Murgangablagerung auf dem Kegel	[-]
G	Faktor (Nenner) für die Länge der Murgangablagerung auf dem Kegel	[-]
β	Neigung im Ablagerungsabschnitt	[°]
β_u	Neigung des steileren Zulaufgerinnes	[°]
V_u	Fliessgeschwindigkeit im Zulaufgerinne	[m/s]
h_u	Abflusstiefe im Zulaufgerinne	[m]
S_R	Reibungsgefälle	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m/s^2]

5.3.8 Modelle zur Simulation von Murgängen

Simulationsmodelle sind heutzutage wichtige Hilfsmittel bei der Beurteilung von Wildbachgefahren. Bei der Anwendung von Simulationsmodellen ist aber zu beachten, dass es sich immer nur um Abbilder der Realität und nicht um die Realität selbst handelt. Darum ist es wichtig ist, dass die Modellresultate immer wieder mit den Daten aus der Realität verglichen und kritisch hinterfragt werden.

Liegen bereits Angaben zu Ereignissen vor, empfiehlt es sich diese nachzurechnen, um die Modellparameter einzugrenzen und das Modell damit zu kalibrieren. Fehlen jegliche Angaben zu Ereignissen, ist äusserst vorsichtig mit den Ergebnissen aus Modellierungen umzugehen.

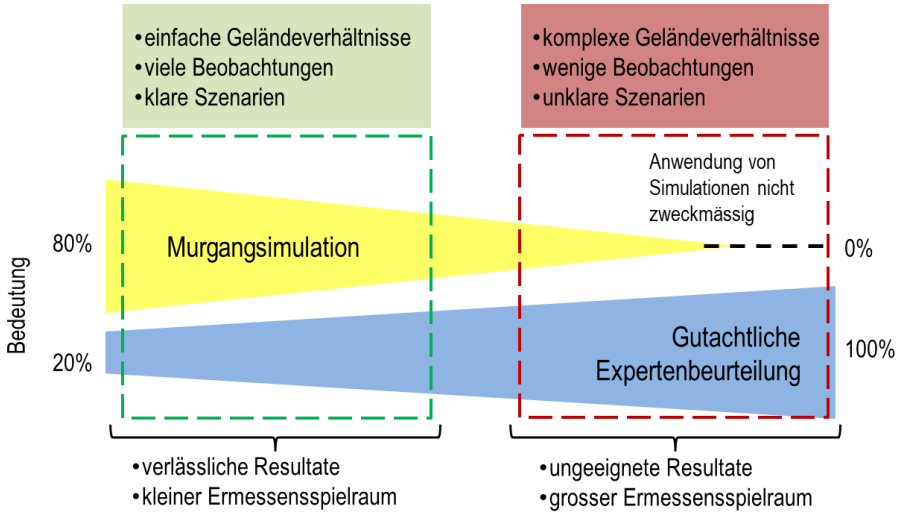


Abbildung 7: Einsatzbereiche Gutachtliche Gefahrenbeurteilung versus Simulationsmodelle (aus Margreth 2019, Praxiskurs Modul Lawinen, angepasst)

Es bestehen verschiedene Simulationsmodelle zur Modellierung der Murgangausbreitung und der Reichweite. Dazu gehören:

Tabelle 12: Zusammenstellung der kommerziell erhältlichen Murgang-Simulationsprogramme (Auswahl)

Modell	Typ	Hersteller	Homepage
FLOW-2D	2-d	FLO-2D Software, Inc., USA	www.fo-2d.com
LAHARZ	2-d	US Geological Survey (Iverson), USA	http://vulcan.wr.usgs.gov/Projects/LAHARZ/framework.html
MassMov2D	2-d	Beguería, S., Van Asch, T.W.J., Malet, J.P. & Gröndal S.	http://digital.csic.es/handle/10261/11804
RAMMS	2-d	WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF	http://ramms.slf.ch/ramms
TopRun-DF TopFlow DF	2-d	IAN-BOKU, Österreich	http://www.debris-flow.at/index.php/de/turundf
Flow-R	2-d	Uni Lausanne	http:// www.flow-r.org

Informationen zu Einsatzzweck und Anwendung sind den jeweiligen Dokumentationen zu entnehmen.

5.4 Schwemmholzaufkommen und -transport

In bewaldeten Einzugsgebieten kann bei Hochwasserereignissen Schwemmholz mobilisiert werden. Dieses kann an Engnissen wie Brücken und Eindolungen zu Verklausungen führen. Entsprechend wichtig ist es, im Rahmen der Gefahrenbeurteilung nebst der Erhebung der Geschiebefrachten auch die Schwemmholzfrachten zu bestimmen. Im Rahmen der Schwachstellenanalyse wird basierend auf den berechneten Schwemmholzfrachten die Verklausungsgefahr an Engnissen wie Brücken und Eindolungen bestimmt. Neben der Schwemmholzmenge ist auch die Art

(Frischholz, Totholz, Wurzelstöcke) und die Form der transportierten Holzstücke (Stämme abgeastet oder ganze Baumstämme mit Ästen und Wurzelteller, Länge und Dicke der Holzstücke) zu berücksichtigen.

5.4.1 Bestimmung von Schwemmholzfrachten

Im Rahmen des Forschungsprogramms WOODFLOW 2015 - 2019 des BAFU zum Thema Schwemmholz in Fliessgewässern - Ein praxisorientiertes Forschungsprojekt, wurde das Thema Schwemmholz intensiv bearbeitet. Im Bericht der Studie [6] sind zahlreiche Methode beschrieben. Diese reichen von einfachen empirischen Ansätzen zur Abschätzung der Schwemmholzfrachten bis zu komplexen GIS-basierten Analysen des Schwemmholz-aufkommens, der Schwemmholzfrachten und der Verlagerungsprozesse.

Nachfolgend werden exemplarisch zwei empirische Schätzformeln zur Bestimmung der Schwemmholzfrachten und des Schwemmholzpotenzials von Rickenmann (1997) [41] und Uchiogi et al. (1996) dargestellt. Die Formeln basieren auf der Auswertung verschiedener Hochwasserereignisse in der Schweiz und in Japan. Als Eingangsgrössen sind Angaben zur Fläche des Einzugsgebietes, zur Wasserfracht oder zur Feststofffracht notwendig.

Die aufgeführten Verfahren geben eine Grössenordnung der Kubatur an. Da es sich um stark vereinfachte Berechnungsansätze handelt, welche die lokalen Gegebenheiten häufig nur ungenügend widerspiegeln, sind grosse Abweichungen möglich. Zuverlässige Ergebnisse mit Einbezug der lokalen Gegebenheiten können nur im Gelände in genügender Qualität erhoben werden.

Die empirischen Schätzverfahren können aber als grobe Überprüfung der Resultate aus den Geländeaufnahmen verwendet werden. Dabei sollten für die Überprüfung, wie in WoodFlow [6] empfohlen, mehrere Schätzformeln verwendet werden.

Tabelle 13 Empirische Schätzformeln zur Bestimmung der Schwemmholzfrachten und des Potenzials

	Schwemmholzfracht	**Schwemmholzpotenzial**
Rickenmann (1997)	$H = 45 * EG^{2/3}$ $H = 4 * V_w^{2/5}$	$H_{pot} = 90 * EG_W$ $H_{pot} = 40 * L_W^2$
Uchiogi et al. (1996)	$H = 0.2 * F$	$H_{pot} = C * EG$

EG Einzugsgebiet [km²]
H Schwemmholzfracht [m³]
Vw Wasserfracht [m³]
F Feststofffracht [m³]
H_{pot} Schwemmholzpotenzial [m³], gültig für EG < 100 km²
EG_W Fläche des bewaldeten Einzugs-gebietes
L_W bewaldete Gerinnelänge [m], gültig für L_W > 20 km
C Faktor für Vegetationstyp
C = 1000: Max.-Wert für Nadelwälder
C = 100: Max.-Wert für Laubwälder
C = 10: Min.-Wert für Nadel u. Laubwälder

5.4.2 Bestimmung der Verklausungsgefahr

Für die Bestimmung der Verklausungswahrscheinlichkeit bestehen in der Schweiz verschiedene Ansätze. Am häufigsten werden die Ansätze nach Lange und Bezzola (2006) [34] oder Schmocker und Hager (2011) [45] angewendet. In WoodFlow [6] sind weitere Ansätze zur Berechnung der Verklausungswahrscheinlichkeit an Brückenpfeilern beschrieben.

Tabelle 14 Ansätze zur Bestimmung der Verklausungswahrscheinlichkeit bei Brücken (Auswahl)

Ansatz		
$P_L = 0 \quad \text{für} \quad \frac{L}{B} < 0.5$	P_L: Verklausungswahrscheinlichkeit an Brücken durch Baumstämme	*(Formel 32)*
$P_L = 0.133 \times \frac{L}{B} - 0.066 \quad \text{für} \quad \frac{L}{B} \geq 0.5$	P_R: Verklausungswahrscheinlichkeit an Brücken durch Wurzelstöcke	*(Formel 33)*
$P_R = 0 \quad \text{für} \quad \frac{D_R^*}{H} < 0.6$	L: Stammlänge [m] B: Breite des Brückenquerschnitts [m] H: lichte Höhe	*(Formel 34)* *(Formel 35)*

Ansatz

$P_R = 1$ für $\frac{D_R^*}{H} \geq 1.0$ *(Formel 36)*

$P_R = 2\frac{D_R^*}{H}$-1.2 für $0.6 \leq \frac{D_R^*}{H} < 1.0$ *(Formel 37)*

mit $D_R^* = (D_{RM}^2 \times D_{RM} \times L_R)^{1/3}$

D^2_{RM}: Maximale Abmessung Wurzelteller [m]
D_{RM}: Minimale Abmessung Wurzelteller [m]
L_R: Stammlänge bei Wurzelstöcken [m]

Referenz: Lange, Bezzola (2006) [34]; Schmocker, Hager (2011) [45]

a) Balkenbrücken:
$\mathrm{P_{RM}} = 1.17 - 0.55\mathrm{Fr}$ für a), b), c) *(Formel 38)*

b) Fachwerkbrücken:
$\mathrm{P_{LM}} = 0.25\mathrm{z} + (4 - \mathrm{z})(\mathrm{Fr} - 0.5)^2$ für $\frac{\mathrm{h}}{\mathrm{H}} = 1$ *(Formel 39)*

c) Brücken mit Geländer:
$\mathrm{P_{LM}} = 1 - \mathrm{y}(\mathrm{Fr} - 0.3)^2$ für $\frac{\mathrm{h}}{\mathrm{H}} = 1.07$ *(Formel 40)*

d) für Balken, Fachwerk und Geländer:
$\mathrm{P_{RM}} = 1.17 - 0.55\mathrm{Fr}$ *(Formel 41)*

e) für Brücken mit Staukragen:
$\mathrm{P_{RM}} = 0.91 - 0.69\mathrm{Fr}$ *(Formel 42)*

P_{LM}: Verklausungswahrscheinlichkeit an Brücken durch Baumstämme
P_{RM}: Verklausungswahrscheinlichkeit an Brücken durch Wurzelstöcke
h: Abflusstiefe [m]
H: Lichte Brückenhöhe [m]
Fr: Froudzahl
für a), b) u. c): Konstanten z = 2 u. y = 1
für d): Konstanten z = 0 und y = 2.5

Referenz: Schmocker, Hager (2011) [45]

Verhältnis zwischen verfügbarem Querschnitt (vQuers) / benötigtem Querschnitt (bQuers)

Verklausungswahrscheinlichkeit:

0% wenn vQuers/bQuers > 1.5

25% wenn 1.1 < vQuers/bQuers < 1.5

50% wenn 0.7 < vQuers/bQuers < 1.1

75 % wenn vQuers/bQuers < 0.7

Der benötigte Querschnitt ergibt sich aus der Fliesstiefe + halber Geschwindigkeitshöhe und der Brückenbreite

vQuers: verfügbarer Querschnitt
bQuers: benötigter Querschnitt

Amt für Wasser und Energie St. Gallen (2017)

Referenz: Amt für Wasser und Energie St. Gallen (2017)

6 Weitere Themen

6.1 Prozessübergänge und Prozessketten

Prozessübergänge

Wildbachprozesse treten selten in Reinform auf. Meisten finden Prozessübergänge statt. Da diese oft zu einer Verschärfung der Gefährdung führen können, ist bei der Gefahrenbeurteilung ein spezielles Augenmerk auf mögliche Prozessübergänge zu legen.

Beispiele:

- Ein Murgang, welcher aus dem Gerinne austritt, lagert im gerinnenahen Bereich einen Grossteil des Geschiebes ab. Bei starkem Wasseranteil, kann ein Teil des Geschiebes auch als Übersarung weiterverfrachtet werden. Mit abnehmender Transportkraft des Wassers, lagern sich die Feststoffe ab. Das ausgetretene Wasser kann aber weiterfliessen, bis ein Vorfluter erreicht wird oder das Wasser in der Kanalisation verschwindet oder im Untergrund versickert. Geschiebeentlastetes Wasser kann dabei zu verstärkten Erosionen, sowohl im Gerinne als auch ausserhalb des Gerinnes führen. Aufgrund der Ablagerungen können neue Fliesswege entstehen.
- Übergang von fluvialem Geschiebetransport zu murgangartigem Transport oder Murgang in steilen Gerinneabschnitten.
- Rutschung aus Gerinneeinhang, welche sich verflüssigt und in Murgang übergeht.
- Geschiebeeintrag von Seitenbach in Vorfluter kann zu einem Rückstau im Vorfluter führen.

Prozessketten

Im Gegensatz zu den Prozessübergängen kommt es bei den Prozessketten nicht zu einer Abfolge gleichartiger Prozesse, sondern durch das Zusammentreffen unterschiedlicher Prozesse oder Einwirkungen zu einer Veränderung des Prozessablaufes. Bei der Gefahrenbeurteilung ist ein spezielles Augenmerk auf mögliche Prozessketten zu legen, insbesondere wenn sie zu einer Verschärfung der Gefährdung führen können.

Beispiele:

- Rutschung im Gerinneeinhang kann zu einem kurzzeitigen Wasserrückstau im Gerinne führen und dadurch einen Murgang auslösen.
- Rutschung auf wassergesättigte Gerinnesohle kann durch die plötzliche Auflast einen Murgang auslösen.
- Felssturzmaterial kann unmittelbar in einen Murgang übergehen (Beispiele Val Strem, Sedrun oder Pizzo Cengalo, Bondo).
- Rutschung verstopft Gerinne (Dammbildung). In der Folge muss mit Dammbruch und anschliessender Flutwelle oder mit Verflüssigung und entsprechend hohem Geschiebetransport gerechnet werden. Aus dem Bruch der Verklausung kann sich auch ein Murgang bilden.
- Gleichzeitige Schneeschmelze infolge Temperaturanstieges und Anstieg der Schneefallgrenze, bei gleichzeitig auftretenden Starkniederschlägen (Niederschlag auf Schnee) führt zu einem deutlich erhöhten Abfluss in den Gerinnen. Als Folge können ausserordentlich starke Erosionen und Murgänge auftreten (Beispiel Hochwasser Oktober 2011 in den westlichen Alpen).

Prozessketten und Prozessübergänge sind meist schwierig zu beurteilen und erfordern häufig vertiefte Prozesskenntnisse anderer Prozesse. Bei komplexen Situationen wird empfohlen, zusätzliche Fachexperten beizuziehen.

6.2 Präsentation/Kommunikation der Resultate

Sowohl bei der Präsentation als auch bei der Kommunikation von Resultaten sind Transparenz und Verständlichkeit wichtig. Die Resultate sind so aufzubereiten, dass sie von den Adressaten verstanden werden, auch wenn diese keine Fachexperten sind.

Weitere Informationen zum Thema Präsentation und Kommunikation können dem Basis-Modul entnommen werden. Unterstützung bietet zudem die Internetseite www.planat.ch/risikodialog.

6.3 Umgang mit Unsicherheiten

Es liegt in der Natur der Sache, dass bei Gefahrenbeurteilung häufig grosse Ermessensspielräume bestehen. Als GutachterIn ist es nicht immer einfach, mit den dabei entstehenden Unsicherheiten umzugehen. Wichtig ist, dass Unsicherheiten bei der Gefahrenbeurteilung klar kommuniziert und nachvollziehbar dokumentiert werden.

Die wichtigsten Fragen, um die Unsicherheiten bei der Gefahrenbeurteilung von Wildbachprozessen zu beurteilen sind:

- Sind die Szenarien richtig gewählt?
- Sind alle Faktoren berücksichtigt, welche die gewählten Szenarien beeinflussen können?
- Liegen die Eingangsgrössen für die Berechnungen und Simulationen in genügender Qualität vor?
- Wurden die relevanten Prozessabläufe, Prozessketten und Prozessübergänge berücksichtigt?

Liegen grössere Unsicherheiten vor, sind sowohl die Unsicherheiten als auch die Gründe der Entscheid Findung nachvollziehbar zu dokumentieren.

Weitere Informationen zum Thema 'Umgang mit Unsicherheiten' können dem Basismodul entnommen werden.

6.4 Qualitätssicherung

Aufgrund nicht korrekt ausgeführter Gefahrenbeurteilungen können grosse Schäden an Personen und Sachwerten entstehen. Sei es, dass durch eine zu optimistische Beurteilung bei einem Ereignis trotzdem Schäden entstehen oder sei es aufgrund einer zu pessimistischen Einschätzung, die zur Folge hat, dass beispielsweise zu hohe Auflagen an eine Ertüchtigung von Bauten gefordert werden, welche nicht notwendig sind. Mit der Qualitätssicherung kann die Gefahr von falschen Entscheidungen reduziert und sichergestellt werden, dass die notwendigen Qualitätsanforderungen eingehalten werden.

- Als Minimalanforderung an jede Gefahrenbeurteilung gilt: **Fachliche Richtigkeit** nach dem Stand der Fachkunde, **Nachvollziehbarkeit** und Transparenz sowie **Umsetzung der gesetzlichen Grundlagen.**
- Gefahrenbeurteilungen enthalten **Fakten**, **Berechnungen** und **Interpretationen**. Es muss ausgewiesen werden, bei welchen Angaben es sich um Fakten und bei welchen um Berechnungen oder Interpretationen handelt. Unsicherheiten sind zu deklarieren.
- Bei komplexen Situationen und besonders wenn mehrere Prozesse eine Rolle spielen, ist es ratsam weitere **Fachexperten beizuziehen**. Dadurch kann die Gefahrenbeurteilung breiter abgestützt werden. Auch in der Diskussion mit Kollegen können unterschiedliche Sichtweisen einfliessen und wichtige Erkenntnisse gewonnen werden.
- Für sachlich falsche Gefahrenbeurteilungen, aufgrund von Verletzungen der Sorgfaltspflicht oder Nichtbeachtung des Standes der Fachkunde, kann der Gutachter durch Verschulden haften.

Weitere Informationen zum Thema Qualitätssicherung finden sich im Basis-Modul und in den 'Empfehlungen zur Qualitätssicherung bei der Beurteilung von Naturgefahren' der PLANAT (2000) [37].

6.5 Berücksichtigung des Klimawandels

Die Berücksichtigung des Klimawandels bei der Gefahrenbeurteilung ist ein Thema, welches immer mehr an Bedeutung gewinnt. Aktuell gibt es in der Schweiz noch keine gefestigte Praxis, wie der Klimawandel in der Gefahrenbeurteilung berücksichtigt werden soll. Dabei beschränkt sich die Berücksichtigung des Klimawandels selbstverständlich nicht auf die Wildbachprozesse. Der Klimawandel wir einen Einfluss auf alle Gefahrenprozesse haben. Bei den Wildbachprozessen, welche stark von den in einem Einzugsgebiet herrschenden Wasserregime abhängig sind, dürften die Auswirkungen jedoch eine besondere Relevanz haben.

Weitere Informationen zum Thema sind in den Unterlagen des Basismoduls [1] und der darin zitierten Literatur zu finden.

7 Literatur

[1] Aller, Dörte (Modulleitung); Röthlisberger,Veronika; Jud,David.2019: Skript Modul BASIS.Praxiskurs Gefahrenbeurteilung gravitative Naturgefahren. Fachleute Naturgefahren Schweiz FAN,V.1.0,79 S.

[2] Angerer H., Pitracher M., Schiegg H.O., Mayer R. (2003): ETAlp - Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten. ETAlp-Handbücher und Kompendien, WLV und BMLW 2003.

[3] Bergmeister K. et al. (2009): Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele.

[4] Bezzola, G.R., Gantenbein, S., Hollenstein, R., Minor, H.-E. (2002): Verklausung von Brückenquerschnitten. Int. Symposium Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau. In: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 175, pp. 87–97.

[5] Bundesamt für Umwelt BAFU [Hrsg.] (2016): Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1608: 98 S. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/publikationen-studien/publikationen/schutz-vor-massenbewegungsgefahren.html

[6] Bundesamt für Umwelt BAFU (Hrsg.) 2019: Schwemmholz in Fliessgewässern. Ein praxisorientiertes Forschungsprojekt. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1910: 106 S.

[7] Bundesamt für Umwelt BAFU (2017): Datenmodell Gefahrenkartierung.

[8] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bundesamt für Wasser und Geologie BWG (1995): Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene, Empfehlung.

[9] Bundesamt für Wasser und Geologie BWG (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten, Berichte des BWG, Serie Wasser. Bern. 118 S.

[10] Bundesamt für Wasser und Geologie BWG (2002): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Praxishilfe Berichte des BWG – Serie Wasser, Nr. 4, Bern.

[11] Bundesamt für Wasser und Geologie BWG [Hrsg.] (2001): Hochwasserschutz an Fliessgewässern, Wegleitungen des BWG, Bern. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/publikationen-studien/publikationen/hochwasserschutz-an-fliessgewaessern.html

[12] Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) [Hrsg.] (1997, pdf 2001): Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten, Empfehlungen, Biel. https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/publikationen-studien/publikationen/beruecksichtigung-hochwassergefahren-raumwirksamen-taetigkeiten.html

[13] Bunte, K., Abt, S.R. (2001): Sampling surface and subsurface particle size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analysis in sediment transport, hydraulics, and streambed monitoring. U.S. Dep. of Agric., For. Serv., Rocky Mt. Res. Stn., Fort Collins, Colorado, USA.Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-74, 428p.

[14] DIN 19663 (1985): Wildbachverbauung; Begriffe, Planung und Bau. Deutscher Normenausschuss, Berlin.

[15] FAN/KOHS (2015): Empfehlung zur Beurteilung der Gefahr von Ufererosion an Fliessgewässern

[16] Fehr, R. (1986): A method for sampling very coarse sediments in order to reduce scale effects in movable bed models. In: Proc. Symposium on Scale effects in modelling sediment transport phenomena, Toronto, IAHR, Delft, pp. 383–397.

[17] Fehr, R. (1987a): Geschiebeanalysen in Gebirgsflüssen – Umrechnung und Vergleich von verschiedenen Analyseverfahren. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 92, 139p.

[18] Fehr, R. (1987b): Einfache Bestimmung der Korngrössenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. Schweizer Ingenieur und Architekt, 38, 1104–1109.

[19] Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen, Empfehlung der Kommission Hochwasserschutz (KOHS), "Wasser, Energie, Luft", 105. Jahrgang, 2013, Heft 1, CH-5401 Baden.

[20] Frick, E. (2013): SEDEX (SEDiments and EXperts). Entwicklung einer praxistauglichen Methode zur Beurteillung der Geschiebe-Szenarien in Wildbächen. Dissertation

[21] Frick, E., Kienholz, H., Romang, H. (2011): SEDEX Anwenderhandbuch. GEOGRAPHICA BERNENSIA, p 42, Bern.

[22] Geiger, H., Zeller, J., & Röthlisberger, G. (1991). Starkniederschläge des schweizerischen Alpen- und Alpenrandgebietes. Grundlagen. Einführung, Methoden, Spezialstudien. Starkniederschläge: Vol. 7. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL.

[23] Gertsch, E. (2009): Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen - Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Dissertation.

[24] HADES (1992). Hydrologischer Atlas der Schweiz. Geographisches Institut GIUB Universität Bern, Bern, 1992. https://hydrologischeratlas.ch/

[25] Heinimann, H.R. et al. (1998): Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren. Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern. 248 S.

[26] https://map.geo.admin.ch/

[27] https://www.e-pics.ethz.ch

[28] https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/extremwertanalysen.html

[29] http://www.planat.ch/de/infomaterial-detailansicht/datum/2014/11/26/planat-projekt-a3-wirkung-von-schutzmassnahmen/) (Aufruf 31. Oktober 2018)

[30] https://www.sg.ch/home/bauen/raum/umwelt/Wasser_und_Energie_AWE/wasserbau/Downloads11.html

[31] Hübl, J., Kienholz, H., Loipersberger, A. (Hrsg.) (2006): DOMODIS: Dokumentation alpiner Naturereignisse [Documentation of Mountain Disasters].

[32] Kienholz H. (2005): Analyse und Bewertung alpiner Naturgefahren - eine Daueraufgabe im Rahmen des integralen Risikomanagements. Geographica Helvtica, Jg. 60, Heft 1.

[33] Kölla E. (1986): Zur Abschätzung von Hochwassern in Fliessgewässern an Stellen ohne Direktmessung. Eine Untersuchung über Zusammenhänge zwischen Gebietsparametern und Spitzenabflüssen kleiner Einzugsgebiete. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Nr. 87.

[34] Lange D., Bezzola G.R. (2006): Schwemmholz: Probleme und Lösungsansätze. Mitteilung Nr. 188, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW der ETH Zürch. 125 S.

[35] Loat R., Meier M. (2003): Wörterbuch Hochwasserschutz.

[36] Mazzorano, B. (2009): Woody debris recruitment prediction methods and transport analysis. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.

[37] PLANAT (2000): Empfehlungen zur Qualitätssicherung bei der Beurteilung von Naturgefahren.PLANAT Reihe 1/2000.

[38] Plattform Naturgefahren der Alpenkonvention (Hrsg.) (2006): Dokumentation von Naturereignissen. Feldanleitung. Insbruck/Bern, 64 S.

[39] Rickenmann, D. (2014): Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen.

[40] Rickenmann D. (1999): Empirical relationships for debris flows. Natural Hazards, 19, 47–77

[41] Rickenmann D. (1997): Schwemmholz und Hochwasser, wasser, energie, luft 89 (5/6), 115-119.

[42] Rimböck A. et al. (2013): OptiMeth – Beitrag zur optimalen Anwendung von Methoden zur Beschreibung von Wildbachprozessen. Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, Schriftenreihe 1, Handbuch 3, Klagenfurt.

[43] Romang Hans (Ed.) (2008): Wirkung von Schutzmassnahmen (PROTECT). Nationale Plattform für Naturgefahren, PLANAT, Bern. 289 S. (Teil A, Grundlagen und Teil E, Wildbäche). (http://www.planat.ch/de/infomaterial-detailansicht/datum/2014/11/26/planat-projekt-a3-wirkung-von-schutzmassnahmen/

[44] Rudolf-Miklau F. et al. (2011): Handbuch Wildholz – Praxisleitfaden. Internationale Forschungsgesellschaft

[45] Schmocker, L. Hager, W.H. (2011). Probability of drift blockage at bridge decks. Journal Hydraul. Engng.137(4): 480-492.

[46] Spreafico M., Lehmann C., Näf O. (1996): Empfehlung zur Abschätzung von Feststofffrachten in Wildbächen. Arbeitsgruppe für operationelle Hydrologie, Mitteilungen Nr4. LHG. Bern

[47] TERMDAT, www.termdat.bk.admin.ch

[48] Tognacca, C., Bezzola, G.R., Minor, H.-E. (2000): Threshold criterion for debris-flow initiation due to channel-bed failure. In G.F. Wieczorek & N.D. Naeser (eds), Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings 2nd International DFHM Conference, Taipei, Taiwan, August 16–18, 2000, pp. 89–97. Rotterdam: Balkema.

[49] Uchiogi, T.,et al.(1996). Design methods for woody- debris entrapment. In: Internationales Symposium INTERPRAEVENT 1996, 279–288.

[50] Zimmermann et al. (1997): Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, Verlag der Fachvereine, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz, 161 p.

[51] Zimmermann M., Lehmann C. (1998): Geschiebefrachten in Wildbächen: Grundlagen und Schätzverfahren. Verbandsschrift 59, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband.

Änderungskontrolle

Version	Datum	Korrekturtyp	Anpassung
0.1	03.06.2019	keine	keine
1.0	25.04.2021	Fehler in Formeln	Fehler in Formeln Nr. 2 und 25 bereinigt
		Literaturverweise	Verweise aktualisiert Fehlende/neue Literatur ergänzt: [1], [41], [49], [51]
		Ergänzungen	Kapitel 5.3.6 Text zu Fliessgeschwindigkeiten ergänzt Kapitel 5.4 Ergänzung Ergebnisse aus WoodFlow Kapitel 6.5 Berücksichtigung Klimawandel ergänzt