FAN Praxiskurs
«Gefahrenbeurteilung gravitative Naturgefahren»

Modul STURZ

Autoren:

Markus Stoffel
Université de Genève, Boulevard Carl Vogt 66, 1205 Genève
Tel. 022 379 06 89, markus.stoffel@unige.ch

Klaus Louis
Louis Ingenieurgeologie GmbH, Weiherstrasse 4, 6353 Weggis
Tel. 041 391 01 91, info@louis-weggis.ch

Hans-Heini Utelli
IMPULS AG Wald Landschaft Naturgefahren, Seestrasse 2, 3600 Thun
Tel. 033 225 60 21, hans-heini.utelli@impulsthun.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 keiner oder 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

Bernard Loup, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern
Philippe Gsponer, Kanton Wallis, Sitten

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

Zitiervorschlag

Stoffel, Markus (ML), Louis, Klaus, Utelli, Hans-Heini, 2022: Skript Modul STURZ. Praxiskurs Gefahrenbeurteilung gravitative Naturgefahren. Fachleute Naturgefahren Schweiz FAN. V3.0, 42 S.

Bezug

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

PDF Download

www.fan-info.ch

© Fachleute Naturgefahren Schweiz (FAN), 2022 Druckdatum 3. Mai 2022

Inhalt

1 Einleitung 5
2. Übersicht behandelte Prozesse, Mechanismen 6
2.1 Übersicht 6
2.2 Einteilung der verschiedenen Sturzarten 6
2.3 Bewegungsphysik 8
2.3.1 Energie: Translationsenergie und Rotationsenergie 8
2.3.2 Bewegungsformen, Sprungweiten und Sprunghöhen 8
2.4 Einteilung in Prozessbereiche 9
2.5 Beispiele häufiger Felsversagungsmechanismen 9
2.6 Abgrenzung zu anderen Prozessen 10
2.6.1 Einzelblöcke in Hangmuren, Murgängen 10
2.6.2 Anthropogen verursachte Sturzprozesse 11
2.7 Spezialfälle 11
2.7.1 Splitter 11
2.7.2 „Meteorit“ 11
2.7.3 „Sekundärer Steinwurf“ als Folge von Sturzimpakten in Gewässer 11
2.7.4 Prozessverkettungen 12
3 Disposition, Einflussfaktoren, Sturzursachen 13
3.1 Geologisch-strukturgeologische Grunddisposition 13
3.2 Geomorphologische Grunddisposition 14
3.3 Vorbereitende Faktoren vor der Sturzauslösung 14
3.4 Unmittelbare Sturzauslösefaktoren 14
3.5 Einflussfaktoren auf den Sturzablauf 15
3.5.1 Hangneigung 15
3.5.2 Bodenparameter 15
3.5.3 Form, Durchmesser und Gesteinshärte 16
3.6 Einfluss des Waldes 16
3.6.1 Steinschlaghemmende Wirkungen im Auslösegebiet 16
3.6.2 Steinschlaghemmende Wirkungen im Transit- und Ablagerungsgebiet 17
3.6.3 Steinschlagfördernde Wirkungen (für Primär- und Sekundärablösestellen) 18
3.7 Einfluss des Klimawandels 18
4 Methodik Überblick – grundlegende Arbeitsschritte 20
5 Überblick Simulationsmodelle 21
5.1 Allgemeine Anforderungen an / Bemerkungen zu Simulationsmodellen 21
5.2 2D- und/oder 3D-Simulationsmodelle? 23
5.2.1 2D-Simulationsmodelle 23
5.2.2 3D-Simulationsmodelle 24
5.3 Notwendige Inputparameter 24
6 Vorgehen Gefahrenbeurteilung im Detail 25
6.1 Einleitung 25
6.2 Auftrag 25

6.3 Grundlagen inkl. Ereigniskataster 25
6.3.1 Grundlagenbeschaffung 25
6.3.2 Grundlagenauswertung 26
6.4 Vorbereitung Begehung 27
6.5 Durchführung Begehung 27
6.6 Schutzbautenkataster 28
6.7 Zusammenfassung der Erkenntnisse pro Liefergebiet und Szenarienbildung 28
6.8 Wirkungsbeurteilung und Ausarbeitung Intensitätskarte pro Prozessquelle 29
6.8.1 Allgemeines 30
6.8.2 Abgrenzung der Intensitätsstufen (30 und 300 kJ) 30
6.8.3 Simulationen / Berechnungen / Abschätzungen 30
6.8.4 Plausibilisierung und Interpretation der Simulationsergebnisse 33
6.8.5 Prüfung im Gelände 34
6.8.6 Ausarbeitung Intensitätskarte pro Prozessquelle 34
6.8.7 Umgang mit Unsicherheiten 35
6.9 Ausarbeitung der definitiven Intensitätskarte und Gefahrenkarte 35
6.10 Dokumentation / Technischer Bericht 36
7 Literatur 38
8 Anhänge 40
8.1 ANHANG 1: Überblick über Steinschlagsimulationsprogramme 40
8.2 ANHANG 2: Factsheets mit Fotodokumentation (Bsp. Kanton Luzern) 43

1 Einleitung

Ziel des vorliegenden Skripts ist es, den heutigen Wissensstand bei der Gefahrenbeurteilung von Sturzprozessen darzulegen. Im vorliegenden Dokument werden die einzelnen Schritte und Kriterien aufgezeigt, die für eine sorgfältige und sachgemässe Beurteilung benötigt werden.

Die Anforderungen bei der Gefahrenbeurteilung nehmen mit wachsendem Detaillierungsgrad zu. Dabei werden gemäss BAFU (2016) drei Stufen mit jeweils unterschiedlichen Massstäben unterschieden: Die Gefahrenhinweiskarte (M1) bildet Sturzprozesse grob dar, in der Gefahrenkarte (M2) werden Prozesse meist über grössere Gebiete «parzellenscharf» beurteilt, und bei Untersuchungen im Rahmen von Bauprojekten oder Detailstudien (M3) wird objektbezogen noch detaillierter gearbeitet.

Das vorliegende Skript beschreibt die wichtigsten Sturzprozesse und deren Beurteilung. Weiter stellt das Dokument eine Methodik vor, wie Gefahrenbeurteilungen durchgeführt werden können, und welche Schritte bei welchem Detaillierungsgrad durchgeführt werden müssen. Ebenso wird die Anwendung von Modellen thematisiert, ohne jedoch auf die Besonderheiten einzelner Modelle einzugehen.

In diesem Dokument wird zudem versucht, in Praxis und Forschung gewonnene Erkenntnisse und Erfahrungen zusammenzutragen. Das Skript fasst daher den aktuellen Wissensstand zusammen, erhebt jedoch nicht den Anspruch, umfassend zu sein. Die Beurteilung von Sturzprozessen erfordert neben den fachlichen Kenntnissen auch grosse praktische Erfahrung (Abb. 1), die mit diesem Skript nur zum Teil vermittelt werden kann.



Abbildung 1: (links) Hätte man den Blocksturz von Tramin (Südtirol) voraussehen können? (rechts) Nein, nicht nur, man hätte ihn aufgrund der stummen Zeugen sogar vorhersehen müssen (© www.spiegel.de)

2. Übersicht behandelte Prozesse, Mechanismen

2.1 Übersicht

Sturzprozesse sind Massenbewegungen, bei denen die aus einer Felswand oder an einer steilen Hangflanke ausgebrochenen Gesteinskomponenten einen grossen Teil der Sturzbahn frei fallend, springend/hüpfend oder rollend zurücklegen. Die Art der Bewegung ist massgeblich von der Neigung und der Beschaffenheit des Untergrundes sowie von der Form der Sturzkörper abhängig, weshalb während des Sturzverlaufes meistens ein mehrfacher Wechsel zwischen den genannten Bewegungsformen erfolgt. Im Gegensatz zu Rutschprozessen verlieren Gesteinskomponenten zeitweise den Kontakt zur Bodenoberfläche, bis sie auf flacherem Gelände oder an einem Hindernis kontinuierlich oder abrupt ihre Bewegungsenergie verlieren und zum Stillstand kommen. Der Prozess Sturz umfasst den gesamten Ablauf eines Sturzereignisses von der Auslösung bis zur Ablagerung.

Sturzprozesse treten primär in steilen Felsgebieten, aber auch an lockergesteinsbedeckten Hängen mit einer Neigung von mehr als 30 auf, wie z.B. in Gehängeschutt oder Moränen. Bei Hangneigungen unter 25-30° erfährt Sturzmaterial eine Verlangsamung, wobei sich im Auslaufbereich oft Schutthalden oder Schuttkegel bilden. Sturzablagerungen bestehen aus kantigen Komponenten, welche durch den Sturzprozess nach ihrem Volumen sortiert wurden: kleinere Komponenten kommen in der Regel früher zum Stillstand, grössere erst weiter unten. Bei besonders grossen Sturzvolumina reichen die Ablagerungsräume oft weit in flacheres Auslaufgebiet hinein.

Stark vereinfacht nimmt die Geschwindigkeit eines Sturzkörpers an ca. >30° geneigten Hängen zu, während bei Hangneigungen von ca. <30° eine Geschwindigkeitsabnahme eintritt.

2.2 Einteilung der verschiedenen Sturzarten

Sturzprozesse werden nach dem Durchmesser der Sturzkomponenten resp. dem Volumen der Sturzmasse klassiert (s. auch BAFU 2016).

Sturzart	***Beschreibung***
Stein- und Blockschlag  *Steinschlag (© Klaus Louis)*  *Blockschlag (© www.rro.ch)*	Einzeln herabstürzende Gesteinskomponenten mit Geschwindigkeiten von bis zu 30 m/s. Die Form der Steine und Blöcke kann meist mit einem angerundeten Ellipsoid oder Quader beschrieben werden. Sie wird durch ihre drei Durchmesser resp. Kantenlängen bestimmt. Die gängigen Grösseneinteilungen sind nach BAFU (2016):

Tab. 5 > Klassifikation der Sturzprozesse nach Durchmesser und Volumen

Prozess	Durchmesser der Komponente	Volumen	Geschwindigkeit	Bemerkung
Steinschlag	<50 cm	-	<30 m/s	I. d. R. Einzelsteine pro Ereignis
Blockschlag	≥50 cm	Vol.<100 m³	<30 m/s	I. d. R. Einzelblöcke pro Ereignis
Felssturz	-	Vol.>100 m³ und Vol.<1 mio m³	10–40 m/s	Felssturzmasse, i. d. R. Sturz einer Vielzahl von Fels- und Gesteinsblöcken, anschliessend Fragmentierung. Felsstürze können sich in verschiedenen Phasen ereignen (Teilabbrüche).
Bergsturz	-	Vol.>1 mio m³	>40 m/s	Initialphase mit kompakter Bergsturzmasse. Prozessraum inkl. Ablagerungszone kann grosse Flächen betreffen.

Felssturz  *Felssturz Evolène, ~2000 m^3, 22. Okt. 2015 (© Raphael Mayoraz).*	Absturz einer grösseren Felsmasse mit einer Kubatur von >100 m^3 bis 1 Mio. m^3 (Festmass). Fragmentierung der Felsmasse während des Absturzes; Interaktionen und Energieaustausch zwischen den bewegten Blöcken. Die Transportgeschwindigkeiten erreichen bis zu 40 m/s. Zusammenhängende Felssturzablagerungen bilden oft Ablagerungsgebiete, die deutlich flacher sind als der natürliche Reibungswinkel des Gesteinsmaterials. Wenn sich aber Felssturzmassen bei einer längeren Transportdistanz auflösen, verhalten sich die einzelnen Sturzkomponenten wie «normale» Stein- und Blockschläge.
Bergsturz  *Bergsturz Piz Cengalo, ~3 Mio. m^3, 23. Aug. 2017 (© www.srf.ch).*	Absturz einer sehr grossen, mehr oder weniger kohärenten Felsmasse mit einer Kubatur >1 Mio. m^3 (Festmass); Transportgeschwindigkeiten bis >40 m/s; intensive Fragmentierung der Sturzmasse während des Absturzes und starke Wechselwirkung zwischen den Komponenten (trocken-granulares Fliessverhalten); bis weit in flaches Vorland hinaus reichende oder an Gegenhang aufbrandende Ablagerungen.
Eisschlag  *Eisschlag (© SBB, H. Müller).*	Abstürzen von Eiszapfen, Eisschollen und Eisblöcken.
Einsturz	Gemäss BAFU (2016) fällt der Prozess „Einsturz“ unter die Kategorie Sturzprozesse und wird daher konkret wie Stein- und Blockschlag behandelt.

Der Abbruch von grossen Eismassen aus Gletschern (Eislawinen) wird der Prozessart Lawinen zugeordnet. Die Gefahrenbeurteilung von solchen Ereignissen erfolgt analog den Schneelawinen.

Primärsturz

Sturzprozess, der seinen Ursprung an einem natürlichen Felsaufschluss hat. Die Ablösung der Sturzkomponente vom Muttergestein erfolgt meist entlang vorgezeichneter Trennflächen, hauptsächlich an Klüften, Schichtfugen oder Korngrenzen, teilweise auch entlang von tektonischen Schwächezonen innerhalb des Felses.

Sekundärsturz

Sturzprozessauslösung durch Remobilisation von ruhenden Steinen/Blöcken (z.B. ehemalige Sturzkomponenten, Hangschutt, Moränenfindlinge) an >30° steilen Hangoberflächen durch äussere Impulse, wie z.B. Viehtritt, Wildtiere, Windwurf (Steine im herausgehebelten Wurzelstock oder durch Aufprall von umstürzenden Bäumen), Erdrutsche, etc..

2.3 Bewegungsphysik

2.3.1 Energie: Translationsenergie und Rotationsenergie

Die **kinetische Energie** E_{kin} (griechisch: kinesis = Bewegung) ist die Energie, die ein abstürzender Stein aufgrund seiner Bewegung enthält. Diese Bewegungsenergie hängt von der Masse und der Geschwindigkeit des Sturzkörpers ab. Blöcke und Grossblöcke bauen deswegen während ihrer Talfahrt wesentlich höhere kinetische Energien auf als Steine. Infolgedessen reichen ihre Sturzbahnen in der Regel viel weiter ins Tal als jene von Steinen. Die kinetische Energie setzt sich aus unterschiedlichen Anteilen an Translationsenergie und Rotationsenergie zusammen. Ihre Masseinheit ist Joule (J) resp. Kilojoule (kJ).

Die **Translationsenergie** (lineare Bewegung des Sturzkörpers) errechnet sich wie folgt:

$E_{trans} = ½\ m*v^2$ *(m = Masse des Sturzblocks, v = Geschwindigkeit in m/s)*

Die **Rotationsenergie** ist jener Anteil an der kinetischen Energie, der bei der Rotation ("Drall") eines abstürzenden Steines um seine X-Achse oder seinen Massenmittelpunkt entsteht. Sie ist abhängig vom Trägheitsmoment und der Winkelgeschwindigkeit des Sturzkörpers und kann – je nach Bewegungsform und Unwucht – bis zu rund 1/3 der Translationsenergie erreichen.

2.3.2 Bewegungsformen, Sprungweiten und Sprunghöhen

Rundliche und kantengerundete Sturzkörper bewegen sich bei niedrigen Geschwindigkeiten bevorzugt durch Rollen vorwärts.

Da die Massenschwerpunkte meist ausserhalb der Rotationsachse liegen, tritt bei höheren Geschwindigkeiten eine Unwucht auf, wodurch rollende Steine zu springen beginnen. Je nach den örtlichen Gegebenheiten kann der Absprungwinkel von sehr flach bis sehr steil variieren. Auch sprungschanzenartige Geländestufen haben ein Abheben des Sturzkörpers vom Boden zur Folge. Diese Sprungbewegung kann physikalisch durch einen schiefen Wurf angenähert werden.

Je steiler der Aufprallwinkel ist (d.h. je flacher geneigt das Terrain am Landeort ist), desto grösser ist der Energieverlust eines Sturzkörpers beim Bodenkontakt.

Die Sprungweite wächst im Quadrat mit der Absprunggeschwindigkeit, d.h. die doppelte Geschwindigkeit führt zur vierfachen Sprungweite. Des Weiteren hängt die Sprungweite auch vom Absprungwinkel ab. Bei steilen Absprungwinkeln fliegt ein Sturzkörper zwar hoch, jedoch nicht weit; auch ein flacher Winkel führt nicht zu einer grossen Sprungweite. Die maximale Sprungweite wird bei einem Absprungwinkel von 45°erreicht.

Das Verhältnis von Sprunghöhe f zu Sprungweite s kann beträgt nach Gerber (1994) wie folgt abgeschätzt werden:

f/s = 1/6 für höhere Sprünge

f/s = 1/8 für normale Sprünge

f/s = 1/12 für flache Sprünge

In der Regel nehmen mit zunehmenden Steindurchmessern die Sprunghöhen und Sprungweiten wegen der höheren Dämpfung und der grösseren Massenträgheit ab. Würfel- und kugelförmige

Blöcke stürzen meist weiter als quaderförmige oder plattige. In seltenen Fällen rollen aufgestellte Platten aufrecht wie ein Wagenrad nach unten und können daher grosse Reichweiten aufweisen.

"Gleiten" findet vor allem bei scheibenförmigen und plattigen Sturzkörpern in der Startphase oder am Ende der Sturzbahn statt. Gleitbewegungen gehen meist mit relativ langsamen Geschwindigkeiten vor sich, da der ständige Bodenkontakt hohe Reibungen erzeugt. Anderseits können Felsplatten mit sehr glatten Oberflächen, die auf Schnee, nassen Wiesen oder auf schmierigem, tonreichem Untergrund "schlittern", grosse Auslaufstrecken erreichen. An Felsvorsprüngen, in Geländeverflachungen oder bei der Kollision mit sonstigen Hindernissen können gleitende Blöcke abrupt gestoppt werden, während sie auf rauem Untergrund oder beim Wechsel in steileres Gelände meist in Roll- oder Sprungbewegungen übergehen.

Bewegung Sturzmasse vs. Bewegung Einzelblock

Beim Absturz von grösseren Gesteinsmassen kommt es zu Interaktionen zwischen den einzelnen Sturzkomponenten, wodurch sich diese immer wieder gegenseitig Impulse geben. Daher erreichen zusammenhängende Felssturzmassen meistens grössere Sturzweiten als einzeln abstürzende Blöcke.

2.4 Einteilung in Prozessbereiche

Das Wirkungsgebiet von Stürzen wird in folgende Prozessbereiche unterteilt:

Ablösungsbereich	Entstehungsgebiet / Herkunftsort des Sturzmaterials; bei Primärsturz meist steile Felsaufschlüsse oder Felswände; bei Sekundärsturz i.d.R. >30° steile Hangflanken.
Transitbereich	Strecke, welche die Sturzkörper traversieren; Hangneigung meist >30°.
Ablagerungsbereich	Zone, in der das Sturzmaterial abgelagert wird und definitiv zum Stillstand kommt (abrupt an einem Hindernis im steilen Transitbereich gestoppte Steine zählen nicht dazu, da sie remobilisierbar sind). In Abhängigkeit von den topographisch-morphologischen Verhältnissen im Transitbereich und dem Sturzvolumen akkumuliert sich das Sturzmaterial meist in <30° steilen Hangfussbereichen / Sturzschuttkegeln oder auf breiteren Geländeverflachungen.

Liefergebiet/Prozessquelle von Primärsturz

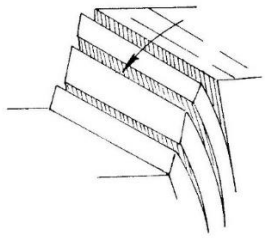
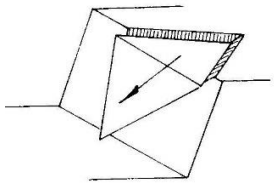
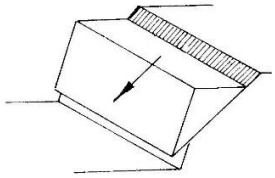
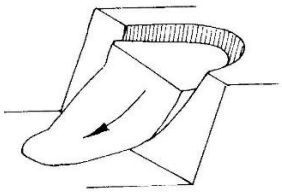
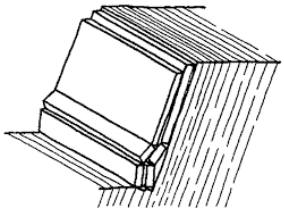
Ablösungsbereich von Felsaufschlüssen, welche eine ähnliche Disposition (hinsichtlich Lithologie, Trennflächengefüge, Durchmesser/Formen der Sturzkomponenten, etc.) zur Auslösung von Sturzprozessen aufweisen.

Liefergebiet/Prozessquelle von Sekundärsturz

Ablösungsbereich von Hangflanken, welche eine ähnliche Disposition (hinsichtlich Durchmesser der remobilisierbaren Sturzkomponenten, Anzahl pro Flächeneinheit, Hangneigung, etc.) zur Auslösung von Sturzprozessen aufweisen.

2.5 Beispiele häufiger Felsversagungsmechanismen

Je nach örtlichen geologisch-tektonischen Gegebenheiten treten verschiedene Versagensmechanismen auf, deren Spektrum von Einzelkomponenten bis hin zu ganzen Prozessquellen reichen kann.

Kippbruch* / *Hakenwurf In harten Festgesteinen mit steilen Diskontinuitätsflächen und säuligen Trennkörpern; bisweilen auch begünstigt durch eine verwitterungsbedingte Entfestigung der darunter liegenden Schicht.	
Keilförmiger Ausbruch Entlang einer hangauswärts geneigten Schnittstelle zweier Diskontinuitätsflächen.	
Planares Abgleiten Entlang einer hangauswärts fallenden Schicht-, Kluft- oder Störungsfläche.	
Muschelförmiger Ausbruch Insbesondere in weichen Festgesteinen, aber auch in homogenen, harten Festgesteinen ohne ausgeprägte vorgezeichnete Strukturmuster.	
Knicken Von steil stehenden Schichtplatten / Felssäulen, mit Schwächung des Fussbereiches (Druckabplatzungen).	
Unterschneidung / Unterkolkung Infolge rückschreitender Erosion von verwitterungsanfälligeren Schichten unterhalb von verwitterungsresistenteren Schichten. Spezialfall: Unterkolkung an einem Prallhang.	

2.6 Abgrenzung zu anderen Prozessen

2.6.1 Einzelblöcke in Hangmuren, Murgängen

Steine und Blöcke, die innerhalb von Murgang- und Hangmurenmassen eingebunden sind und mit diesen zusammen niederfahren, sind per definitionem keine Sturzprozesse, sondern sind den entsprechenden Prozessen zuzurechnen. Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass mindestens ein Fall dokumentiert ist, wo Steine aus einer zum Stillstand gekommenen Hangmure weiter gerollt sind und weiter unten Schäden an Gebäuden verursacht haben (dies in einem Gebiet, wo aufgrund fehlender Felswände nicht mit Steinschlag gerechnet wurde).

2.6.2 Anthropogen verursachte Sturzprozesse

Herabstürzende Steine oder Bergschlag aus Tunnelfirsten, künstlich angeschnittenen Felsböschungen, instabilen Trockensteinmauern, herabfallende Dachziegel und dergleichen. Solche Sturzprozesse resultieren meist aufgrund von Bauwerksmängeln und müssen von natürlich entstandenen Sturzprozessen klar abgegrenzt werden.

2.7 Spezialfälle

Bei der Gefahrenbeurteilung sind auch die Möglichkeit und die Auswirkungen von ausserordentlichen Sturzprozessarten zu prüfen und gegebenenfalls zu berücksichtigen.

2.7.1 Splitter

Von einem in Bewegung befindlichen Block abplatzende Gesteinstrümmer können geschossartig sehr hoch und weit fortgeschleudert werden. Zu Absplitterungen kann es auch bei Blockeinschlägen in Schutzdämme mit bergseitiger Steinrollierung kommen.

Die Splitterwirkung wird in der Gefahrenkarte in der Regel nicht berücksichtigt, Splitter können aber bedeutend weiter transportiert werden, als Steine und Blöcke im eigentlichen Sturzprozess (z.B. Staubbachfall Lauterbrunnen 2018 über 200 m oder am Hellhore bei Kandersteg 2008 bis 500 m weit).

2.7.2 „Meteorit“

In Ausnahmefällen können Sturzkörper aus steilen Felsflanken mit extrem hohen und weiten Flugbahnen abstürzen und bis zu hunderte Meter vom Felswandfuss entfernt im Talboden einschlagen. Solche aussergewöhnlichen schiefen Würfe entstehen infolge eines zufälligen Zusammentreffens von mehreren ungünstigen Faktoren an der letzten Absprungstelle, wie zum Beispiel der Querung einer «Sprungschanze» in Kombination mit extrem starker Blockrotation.



Abbildung 2: Auswurfbereich (rot umrandet) des Sekundären Steinwurfs als Folge des Felssturzes in die Kl. Emme, Wolhusen (Drohnenaufnahme vom 11. Januar 2016; © Klaus Louis).

2.7.3 „Sekundärer Steinwurf“ als Folge von Sturzimpakten in Gewässer

Dieser Sekundärsturzprozess entsteht durch Herauskatapultieren / Herausschleudern von Flussschotter als direkte Folge eines Felssturz- oder Grossblock-Impakts in ein Flussbett, das mit wassergesättigtem Flusskies/Flussschotter bedeckt ist (Gerber, 2016; Louis, 2017). In diesem nichtkomprimierbaren Medium wird der Impaktdruck blitzartig und nahezu vollständig auf die Umge-

bung übertragen. Vom Grundprinzip her ist dieser Prozess mit dem Kraterauswurf bei einem Meteoriteneinschlag vergleichbar. Da der Sekundäre Steinwurf fast explosionsartig und mit aussergewöhnlich hohen Geschwindigkeiten abläuft, ist er für Personen und Sachwerte sehr gefährlich.

2.7.4 Prozessverkettungen

Bei Prozessverkettungen sind vor allem Fels- und Bergstürze von Interesse. Der Steinschlag ist für die Auslösung von Folgeprozessen kaum relevant.

Fels- und Bergstürze haben verschiedene Ursachen. Grundvoraussetzung sind jeweils Schwächezonen, die u.a. tektonischen Ursprungs sind oder durch Instabilitäten nach dem Gletscherrückzug bedingt sein können (z.B. Moosfluh, Riederalp VS). Untersuchungen von Fischer et al. (2012) zu 56 Fels- und Bergsturzereignissen zeigen, dass fast 50% aller Stürze mit einem Volumen von 10‘000 bis 100‘000 m³ aus Gebieten stammen, in denen sich die Vergletscherung seit der kleinen Eiszeit wesentlich verändert hat.

In hochgelegenen Gebieten spielt ausserdem der Permafrost eine entscheidende Rolle (s. auch Kapitel 3.7). Wie Fischer et al. (2012) zeigen, liegen viele Startgebiete von Sturzprozessen im Bereich der unteren Permafrostgrenze. Mani (2016) zeigt verschiedene Beispiele von Prozessketten auf: So können die Ablagerungen von Fels- und Bergstürzen Startgebiete für Murgänge bilden. Ob Murgänge aus einer Sturzablagerung entstehen können, hängt hauptsächlich vom Böschungswinkel der Ablagerungen und den Materialeigenschaften ab. Durch den primären Prozess verändert sich die Disposition für die Entstehung von Murgängen. Eine solche Prozesskette ist etwa als Folge des Bergsturzes vom Piz Cengalo im August 2017 aufgetreten. Ein weiteres Beispiel ist der Spreitgraben bei Guttannen, wo Felsstürze aus dem Permafrost des Ritzlihorns ab dem Sommer 2009 mehrere Murgänge verursachten, die ihr Startgebiet in den Felssturzablagerungen hatten. Die grossen Materialmengen wurden in der Aare abgelagert. Dadurch wurde die Sohle in der Aare teilweise über 20 m angehoben wurde (Mani, 2016).

Ablagerungen von Fels- und Bergstürzen können in Tälern Dämme bilden, durch welche Flüsse oder Bäche gestaut werden. Bei wenig durchlässiger Sturzablagerung bildet sich ein See. Solche Seen können ausbrechen, entweder durch Überströmung mit Breschenbildung, durch eine neue Sturzmasse, die in den See fällt und dadurch eine Impulswelle auslöst oder durch sich selbst verstärkende innere Erosion (sog. piping) in der Sturzmasse. Ein historisches Beispiel einer solchen Prozesskette ist der Bergsturz von Derborence (Mani, 2016). Etwas unterhalb des Gipfelbereichs der Diablerets lösten sich 1714 und 1749 insgesamt ca. 50 Mio. m³ Fels und führten im Talkessel von Derborence zum Aufstau eines Sees. Aufgrund der Reliefsituation konnte sich die Ablagerung stark ausbreiten und das Risiko eines Seeausbruchs bestand nicht.

3 Disposition, Einflussfaktoren, Sturzursachen

3.1 Geologisch-strukturgeologische Grunddisposition

Die Felswandüberprüfung ist der massgebende Ausgangspunkt bei der Gefahrenbeurteilung von Sturzprozessen (Abb. 3). Hier werden die vorhandenen Sturzgefahrenpotentiale, Sturzkörpergrössen und Versagungsmechanismen im Auslösebereich bestimmt. Eine Felswandbeurteilung wird je nach Detaillierungsgrad der Abklärung vom Gegenhang mit dem Fernglas, am Fuss der Felswand, am hängenden Seil oder mit Hilfe von Drohnen durchgeführt. Aus dem Verwitterungszustand von Ausbruchstellen kann auf das Alter eines Abbruchs zurück geschlossen werden.

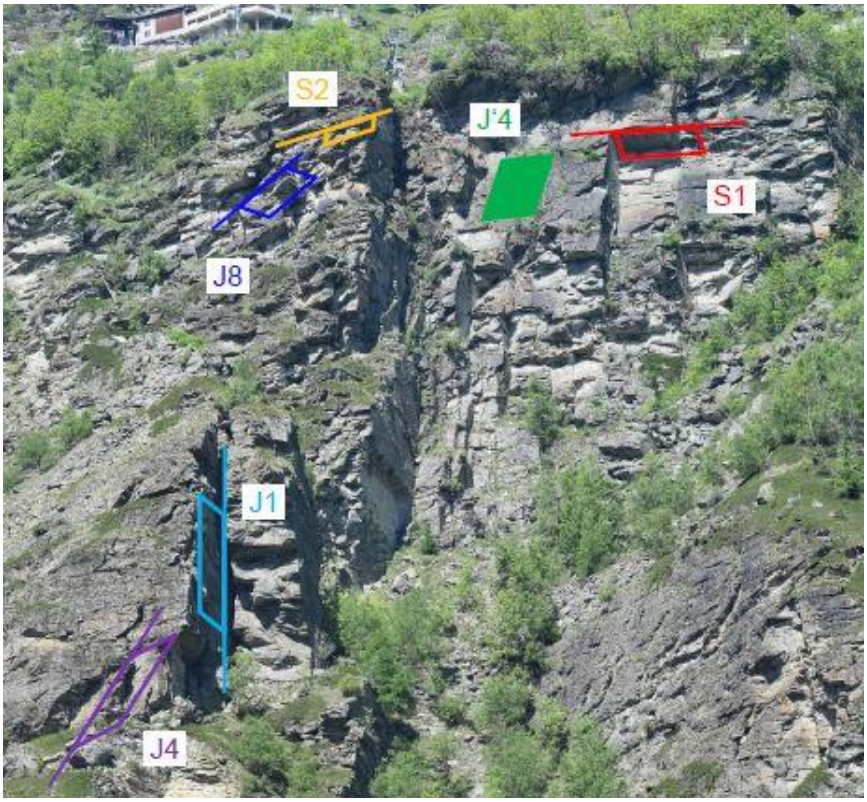


Abbildung 3: Bei einer genauen Felswandüberprüfung werden Sturzpotentiale, Blockgrössen, Versagungsmechanismen und Ausbruchwahrscheinlichkeiten ermittelt (© Philippe Gsponer).

Folgende Grunddispositionen bestimmen die Form, Grösse sowie die Festigkeit der Kluftkörper und begünstigen die Entstehung von Sturzereignissen (Abb. 4):

- Lithologie: Art und Beschaffenheit des Gesteins.
- Sedimentär-tektonisch vorgezeichnetes Trennflächengefüge:
    - Schichtdicken, Bankungsmächtigkeiten
    - Kluftdichte (Kluftsets, Kluftabstände engständig / weitständig)
    - Klufthabitus (Durchtrennungsgrad, Kluftöffnungsweite)
    - Raumstellung der Klüfte, Durchschneidungswinkel



Abbildung 4: Geologisch-geomorphologische Grunddisposition (© Klaus Louis)

3.2 Geomorphologische Grunddisposition

- Oberflächengeometrie: überwiegend steiler ca. 30°, meist >40-45° geneigte Hangflanken bis hin zu senkrechten und überhängenden Felswänden.
- Gravitativ begünstigte Auflockerung des Gebirgsverbandes entlang sedimentärer, tektonischer und spannungsbedingter Gesteinstrennflächen (Schichtung, Korngrenzen, Klüftung, Schieferung, Störungen, Sprödrisse, Zugrisse, sonstige Schwächezonen; Abb. 4). Die Auflockerung betrifft vor allem die Felswandoberflächen, sie kann aber bisweilen auch tief in den Fels hineingreifen.

3.3 Vorbereitende Faktoren vor der Sturzauslösung

Massgebliche Faktoren für einen Abbau der Widerstandsbilanz des Felsgefüges sind:

- Verwitterung
  - Mechanisch-physikalische Verwitterung
  - Chemisch-mineralogische Verwitterung
  - Biologisch-biochemische Verwitterung
- Spannungszunahme im Felsverband, z.B. durch gravitative Hangtektonik, Neotektonik, nacheiszeitliche Entlastungsvorgänge, Sackungsbewegungen, grosse tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen (inkl. Frost-Tau-Zyklen), Rückgang des Permafrosts oder Eissegregation.
- Entlastungen im Wandfussbereich durch den Wegfall des stützenden Widerlagers, bzw. durch erosive Unterschneidung des Hanges.
- Aufweitung der Gesteinstrennflächen bis hin zur Zerlegung des Gebirges in einzelne schlanke Felsschollen.
- Wachstumsdruck von Baumwurzeln in Felsklüften.

3.4 Unmittelbare Sturzauslösefaktoren

- Zunahme der lokalen Spannungsverhältnisse im Umfeld von stattgefundenen Felsausbrüchen und von knickenden Gesteinssäulen aufgrund der bestehenden Auflast → Druckabplatzungen im Fussbereich.
- Langsame Kippbewegungen von abgelösten Felstürmen mit der Folge vermehrter Abwürfe instabiler Steine von der Wandoberfläche.
- Übertragung von Windkräften oder ungleichmässigen Schneelasten über die Baumwurzeln in den Fels (Hebelwirkung).

- Wasserzirkulation in Gesteinsrissen, Klüften und Spalten mit der Folge von steigenden Kluft- oder Porenwasserdrücken
    - Nach ergiebigen Niederschlägen
    - Nach plötzlichem Schmelzwasserandrang (aus Schnee- oder Eisschmelze)
    - In verengten Durchflussquerschnitten
    - Bei Vereisung oder Verstopfung der Wasseraustrittsstellen
- Hohe Frostdrücke bei gefrierendem Kluftwasser; sukzessive Zerstörung von Felsbrücken bei mehrfachen Frost-Tauwechseln und Segregationseis.
- Erdbeben: Die Erschütterung durch Erbeben kann je nach Intensität Sturzprozesse vom kleinen Steinschlag bis hin zu Bergsturz auslösen.
- Beeinflussung durch Tiere (grabende Tiere, Lostreten von Steinen an der Oberfläche, etc.).
- Anthropogene Einflüsse, wie z.B. Veränderungen durch Grabarbeiten, Anschnitte, Auflasten, Bergbau, Holzereiarbeiten, etc.
- Schockwellen, z.B. durch Erschütterungen bei Erdbeben, Blitzschlag, Sprengungen, Überschallknall, Vibrationen durch Strassen-/Schienenverkehr, Bohrungen, etc.

Das Zusammentreffen mehrerer der genannten Faktoren beschleunigt den Moment der Sturzauslösung. Je tiefer die Auflockerungszone in den Felsverband hineingreift, desto grösser sind die möglichen Abbruchkubaturen.

3.5 Einflussfaktoren auf den Sturzablauf

3.5.1 Hangneigung

Die Höhe des Auslöseortes in Steilwänden sowie die Neigung und Struktur der Felsoberfläche im Auslösebereich (glatt, ruppig) entscheiden über die Länge der freien Fallstrecke und die daraus resultierende Anfangsgeschwindigkeit des Sturzes. Vielfach erreichen Sturzkörper ihre maximale Bewegungsenergie bereits am Ende eines längeren freien Falls aus der Felswand. Hingegen erlangen Sturzkörper, die ihre Sturzbewegung an steilen Hangflanken mit Rollen oder Gleiten beginnen, ihre maximale Energie meist erst im weiteren Sturzverlauf.

Beim Übergang in steileres Gelände kommt es – bei gleichbleibender Oberflächenbeschaffenheit – zu einer Geschwindigkeitszunahme (Beschleunigung), während flachere Geländeneigungen zu einer Abbremsung des Sturzkörpers führen. Stark beschleunigte Blöcke können bis weit in flaches Gebiet vordringen.

3.5.2 Bodenparameter

Bei gleichbleibenden Hangneigungen entscheiden die Art und Mächtigkeit der Lockergesteinsbedeckung und die spezifischen Kennwerte des Untergrundes (Haft- und Gleitreibung, normale und tangentiale Dämpfung, Rollwiderstand, Oberflächenrauigkeit, Konsistenz / Lagerungsdichte, aufgeweicht / ausgetrocknet / gefroren) über den weiteren Energieverlauf eines Sturzkörpers.

Auf tiefgründigen, durchnässten, laub- oder schneebedeckten Böden sind die Dämpfung und der Rollwiderstand grösser als auf flachgründigen, trockenen oder gefrorenen Böden. Beim Aufprall eines Sturzkörpers auf einer weichen Unterlage kommt es infolge der Lockermaterialverdrängung zu Energieverlusten. Die Eindringtiefe und die Form des Aufpralltrichters bestimmen den Verlauf des Absprungprozesses (Absprunggeschwindigkeit, -richtung, -winkel; Abb. 5).

Auf kahlen, glatten Felsoberflächen kann sich ein rollender Stein beschleunigen, während in rauen Geröllhalden eine Abnahme der Bewegungsenergie erfolgt. Beim Auftreffen eines rollenden oder springenden Steines auf ein Hindernis (z.B. Rückseite eines ruhenden grösseren Blockes, Felskante, Baumstamm, Strunk, Strauch, Asthaufen, Verbauung), kann seine Bewegungsenergie schlagartig vernichtet werden, wodurch er unter Umständen auch in steilem Gelände liegen bleibt. Bei einem aussermittigen Aufprall kann die Sturztrajektorie stark abgelenkt werden.

Je nach Masse eines Sturzkörpers wirken sich die Bodenmächtigkeit und die Oberflächenrauigkeit unterschiedlich auf den Energieverlauf aus. Während beispielsweise kopfgrosse Steine auf einer

20 cm mächtigen aufgeweichten Waldbodenschicht über Fels stark abgebremst werden, erleiden Blöcke und Grossblöcke auf demselben Untergrund wesentlich geringere Energieverluste, da sie die dünne Bodenschicht durchstanzen, so dass für sie der darunterliegende Fels massgebend ist. Hingegen können schwere Grossblöcke in mehrere Meter mächtigen weichen Böden tief einsinken und aufgrund der hohen Dämpfungen und Rollwiderstände grosse Energieverluste erleiden.

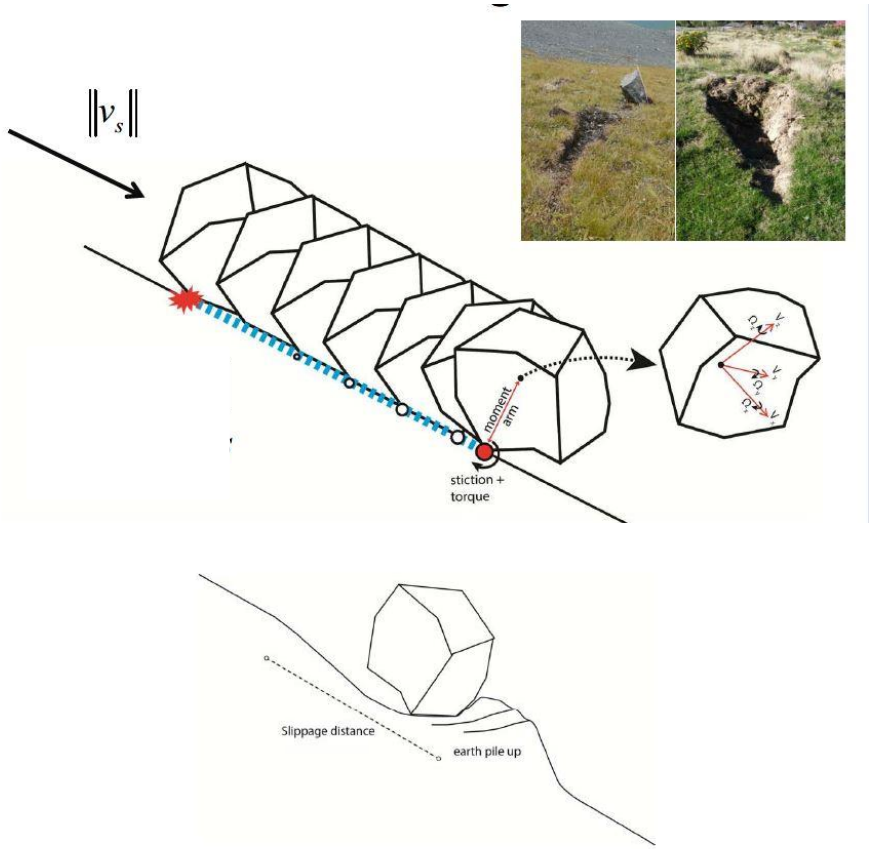


Abbildung 5: Der Block-Boden-Kontakt erfolgt in der Regel nicht über einen einzelnen Kontaktpunkt sondern entlang einer Kontaktstrecke. Dabei ist die Reibung entlang dieser Linie nicht konstant. Die Haftreibung und das Drehmoment am Ende des Kontakts beeinflussen Sprunghöhe und Rotation (verändert nach RAMMS Rockfall Factsheet).

3.5.3 Form, Durchmesser und Gesteinshärte

Die Form (würfel-, quader-, säulen-, platten-, ellipsen- oder kugelförmig, polyedrisch, irregulär) und die Grösse der Sturzkörper sind von den Abständen und den Schnittwinkeln der verschiedenen Fels-Diskontinuitätsflächen abhängig.

Ob ein Felsblock während des Sturzverlaufes seine ursprüngliche Grösse und Form beibehält, ob bei den Bodenkontakten die Kanten abschlagen oder ob er in kleine Trümmer zerplatzt, hängt (neben der Härte der Terrainoberfläche) von der spezifischen Gesteinshärte und von der Anzahl und Ausbildung der vorhandenen Trennflächen ab.

Des Weiteren übt auch die Oberflächenbeschaffenheit der Sturzkörper selbst, d.h. das Vorhandensein von Kanten, Ecken, Dellen, etc., einen grossen Einfluss auf die Bewegungsart aus.

3.6 Einfluss des Waldes

Der Wald kann sowohl steinschlaghemmende, als auch steinschlagfördernde Wirkungen haben.

3.6.1 Steinschlaghemmende Wirkungen im Auslösegebiet

- Verfestigung der Bodenoberfläche und Zusammenhalt labiler Blöcke an der Felsoberfläche (meist an Hangkanten) durch das Wurzelwerk.

- Ausgleich der täglichen Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen durch die gleichmässige Beschattung am Tag und die langsame Wärmeabgabe bei Nacht.

3.6.2 Steinschlaghemmende Wirkungen im Transit- und Ablagerungsgebiet

- Aufbau einer dämpfenden Bodenschicht durch Nadel- und Laubstreu.
- Abruptes Stoppen von Sturzkörpern mit geringer bis mittlerer Intensität bei einem mittigen Aufprall an Baumstämmen (Abb. 6). Ein aussermittiger Aufprall bewirkt eine Ablenkung der Fallrichtung und Energieverluste.
- Bäume können langsam abstürzende Blöcke bis 5 m^3 stoppen und die Ausbreitung und Intensität von Blöcken bis 20 m^3 beeinflussen. Stark beschleunigte Blöcke oder grössere Steine erreichen allerdings so hohe Bewegungsenergien, dass durch die Aufprallwucht selbst dickstämmige Bäume abgeknickt werden (was aber dennoch eine grosse Energievernichtung bewirkt). Baumkronen können abbrechen, wenn der Stamm durch die Kollision eines Blockes schlagartig in starke Schwingungen versetzt wird.
- Die erforderliche Energie für das Durchschlagen eines Baumstammes wird von vielen Faktoren massgeblich beeinflusst wie z.B. Baumart und -zustand, Durchmesser, Trefferhöhe und Gesteinsfestigkeit. Gewisse Baumarten, wie z.B. Ahorn und Linde gewähren einen hohen und langfristigen Steinschlagschutz, da sie schwere Steinschlagtreffer besser überstehen, während beispielsweise Fichten und Buchen bei grösseren Stammverletzungen eine erhöhte Fäulnisanfälligkeit aufweisen.
- Die Effizienz der Steinschlagschutzwirkung des Waldes hängt also ab von der kinetischen Energie der Sturzkörper, der Arten- und der Duchmesserverteilung der Bäume, dem Bestockungsgrad sowie der bewaldeten Hangstrecke. Bei einer Bestandesgrundfläche von >25 m^2/ha ist bereits eine signifikante Steinschlag-Schutzwirkung zu erwarten (abhängig von den auftretenden kinetischen Energien der Sturzkörper und der Grösse der Waldlücken). Die Anforderungen an einen idealen Steinschlagschutzwald sind in Frehner et al. (2005) beschrieben.
- Auch abgestorbene Bäume, Baumstümpfe und quer liegende Baumstämme bieten Schutz vor Steinen und langsamen Kleinblöcken, der jedoch mit der fortschreitenden Verrottung abnimmt.
- Durch den Barriereeffekt des Schutzwaldes werden die Durchgangsfrequenz und somit auch die Erreichungswahrscheinlichkeit und Intensität von Sturzprozessen im Schadenpotenzial-raum reduziert.
- Grössere Ereignisse wie Felsstürze können durch Bäume nicht aufgehalten werden (Abb. 7). Dennoch kann der Wald die räumliche Ausbreitung reduzieren.



Abbildung 6: (links) Wachstumsdruck von Baumwurzeln zwängt den geklüfteten Fels auseinander; (rechts) Selbst grosse Sturzblöcke können von Bäumen aufgehalten werden, wenn ihre Intensitäten noch nicht (resp. nicht mehr) hoch sind (© Klaus Louis).



Abbildung 7: (links) Von Sturzblöcken mit grossen Energien werden selbst stattliche Bäume zerstört; (rechts) Diese Felssturzmasse ist in einen Wald gefahren und hat ihn vollkommen zerstört. Durch die Energievernichtung kam die Sturzmasse jedoch hier zum Stillstand.

3.6.3 Steinschlagfördernde Wirkungen (für Primär- und Sekundärablösestellen)

- Übertragung von Schnee- und Windkräften über das Wurzelwerk in den Untergrund, Aufweitung von Gesteinsrissen und -klüften durch Wurzeldruck (Hebelwirkung, Beschleunigung der mechanischen Verwitterung; Abb. 6).
- Aufreissen des Bodens/Hangschutts und Auslösung von Sekundärsteinschlag durch entwurzelte Bäume; Remobilisation von ruhenden Steinen durch den Anprall von umfallenden Bäumen.
- Chemische Zersetzung der Felsoberfläche durch die Ausscheidung organischer Wurzelsäuren.

3.7 Einfluss des Klimawandels

Der Einfluss des Klimawandels auf Sturzprozesse ist besonders im Hochgebirge sichtbar, wo durch das Auftauen von Permafrost teilweise vermehrt Stein- und Blockschläge, aber auch Felsstürze beobachtet werden (Stoffel & Huggel, 2012). Stark an Bedeutung gewonnen hat die Erforschung der Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Massenbewegungen im Hochgebirge spätestens nach dem Sommer 2003. Obwohl die wichtige Rolle des Permafrostes im Hochgebirge in den nachfolgenden Hitzesommern 2006 und 2015 bestätigt werden konnte, ist der Zusammenhang von Klima und Steinschlag durchaus komplexer als vielfach vermutet. Um den Prozess gänzlich zu erfassen, bedarf es eines detaillierten Verständnisses der beteiligten Prozesse, einschliesslich weiterer Auslösemechanismen, und deren Sensitivität gegenüber eines sich ändernden Klimas. Fehlmann et al. (2016) geben eine Übersicht der relevanten Prozesse:

Die Grunddisposition für Sturzprozesse (s. Kapitel 3.1 und 3.2) wird durch das Klima kaum verändert. Ein möglicher Einfluss des Klimas auf die Topographie kann infolge Gletscherrückzug entstehen, indem durch glaziale Erosion übersteilte Bergflanken neu als Sturzquellen wirken können. Für den Steinschlag ist dies aber von geringerer Bedeutung. Ebenso kann die Klüftung in dauerhaft gefrorenen Felswänden über die letzten Jahrtausende und infolge Eissegregation aufgeweitet worden sein, was nun und wegen des Auftauens des Eises häufigere Ablösungen begünstigt.

Die variable Disposition kann sich dagegen infolge Klimaveränderungen wesentlich ändern. Höhere Temperaturen führen zu einer Erwärmung der Felskörper und damit zu einer Degradation des Permafrostes. Wesentliche Prozesse sind dabei:

- Tiefendegradation: Durch eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur an der Felsoberfläche wird bei gleichbleibendem Temperaturgradienten die Permafrostbasis (bei 0°C) schneller erreicht. Durch die damit verbundene Anpassung des Temperaturprofils erfolgt somit eine Tiefendegradation aus dem Berginnern, welche grössere Felspartien destabilisieren kann. Diese Anpassung des Temperaturprofils erfolgt aufgrund der sehr langsamen Wärmediffusion allerdings mit einer starken Verzögerung, die je nach Fall Jahrzehnte, Jahrhunderte oder gar Jahrtausende betragen kann. In dieser Hinsicht hat die Erwärmung des letzten Jahrhunderts in hochgelegenen, steilen Bergflanken „lediglich“ eine Tiefe von einigen Dut-

zend Metern erreicht.

- Eintiefung der Auftauschicht: Über wesentlich kürzere Zeitskalen (Monate bis Jahre) kann Permafrostdegradation von oben nach unten stattfinden, das heisst direkt unterhalb der nur saisonal gefrorenen Auftauschicht auftreten. Die Permafrost-Untergrenze kann sich dabei bereits durch einen extrem heissen Sommer weiter nach oben verschieben. Die verstärkte Steinschlagaktivität im Sommer 2003 kann etwa auf diesen Prozess zurückgeführt werden. Eine wichtige Rolle für die Erklärung dieser unerwartet schnellen Reaktion spielen sowohl advektive wie auch konvektive Prozesse, welche gegenüber der reinen Wärmediffusion wesentlich schneller ablaufen und durch Brüche oder Spalten in der Felsoberfläche gefördert werden.

Bei den auslösenden Ereignissen ist die Klimasensitivität in vielerlei Hinsicht relevant:

- Frostwechselhäufigkeit: Temperaturänderungen können zu Veränderungen in der Häufigkeit von Frostwechseln führen. Diese wiederum beeinflussen die Häufigkeit von Sturzprozessen. Ein linearer Zusammenhang existiert jedoch nicht, da wie weiter oben bereits besprochen, oft ein Zusammenspiel mit anderen auslösenden Ereignissen und insbesondere der Wasserverfügbarkeit wichtig ist.
- Hitzeperioden: Langandauernde Hitzeperioden im Sommer können im Permafrost zu einer deutlichen Erwärmung des Fels-/Eis-Gemisches führen. Dadurch wächst die Wahrscheinlichkeit, dass der kritische Temperaturbereich von 0 bis –1.5 °C erreicht wird, bei welchem die Stabilität stark reduziert ist. Hinzu kommt, dass durch das Auftauen des Eises in Klüften neue Wasserwege geöffnet werden und so Wasser in neue Bereiche eindringen und dort einen hydrostatischen Druck aufbauen kann.
- Grosser Wasseranfall: Oberflächenabfluss im Zusammenhang mit Starkregen oder Schneeschmelze kann abgelöste Blöcke mobilisieren und so zu Steinschlag führen. Intensive Niederschläge und vor allem ein grosser Schmelzwasser-Anfall können den hydrostatischen Druck in Kluftsystemen weiter erhöhen und so Sturzprozesse grösseren Ausmasses auslösen. Dieser Prozess ist vor allem im Frühling, wenn Gesteinspakete durch die winterliche Frosteinwirkung aufgelockert sind, wirksam. Im Sommer und Herbst ist die Sensitivität bezüglich des Wasserinputs geringer, da sich die Klüfte dann teilweise wieder schliessen.

Zusätzlich zu verschiedenen Zeitskalen gilt es bei den meisten Prozesse räumliche Muster zu beachten. Im Hochgebirge erschweren die starke räumliche Heterogenität in der Topographie und stark variable Bodeneigenschaften allgemein gültige Schlüsse. So spielen nur schon auf Höhenlagen unter 2500 Metern ganz andere Prozesse eine wichtige Rolle als in periglazialen Gebieten. Ebenso ist die Exposition entscheidend, da sie über Strahlungseffekte die Oberflächentemperatur massgeblich beeinflusst. So sind etwa Frostwechsel in südexponierten Flanken wesentlich häufiger als in nordexponierten Lagen vergleichbarer Höhe. Im Gegensatz dazu wirkt sich eine kurzzeitige Erwärmung stärker auf nordexponierte Flanken aus, da diese auch stärker durch die Lufttemperatur beeinflusst sind. Ebenso können dreidimensionale Effekte, wie beispielsweise der Wärmetransport von einer Süd- zu einer Nordflanke, eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen. Des Weiteren beeinflussen Bodeneigenschaften wie das Bodenmaterial (Schutt/Fels), die Vegetation oder die Schnee- und Eisbedeckung massgeblich die Kopplung zwischen Lufttemperatur und Temperaturverhältnissen im Untergrund.

4 Methodik Überblick – grundlegende Arbeitsschritte

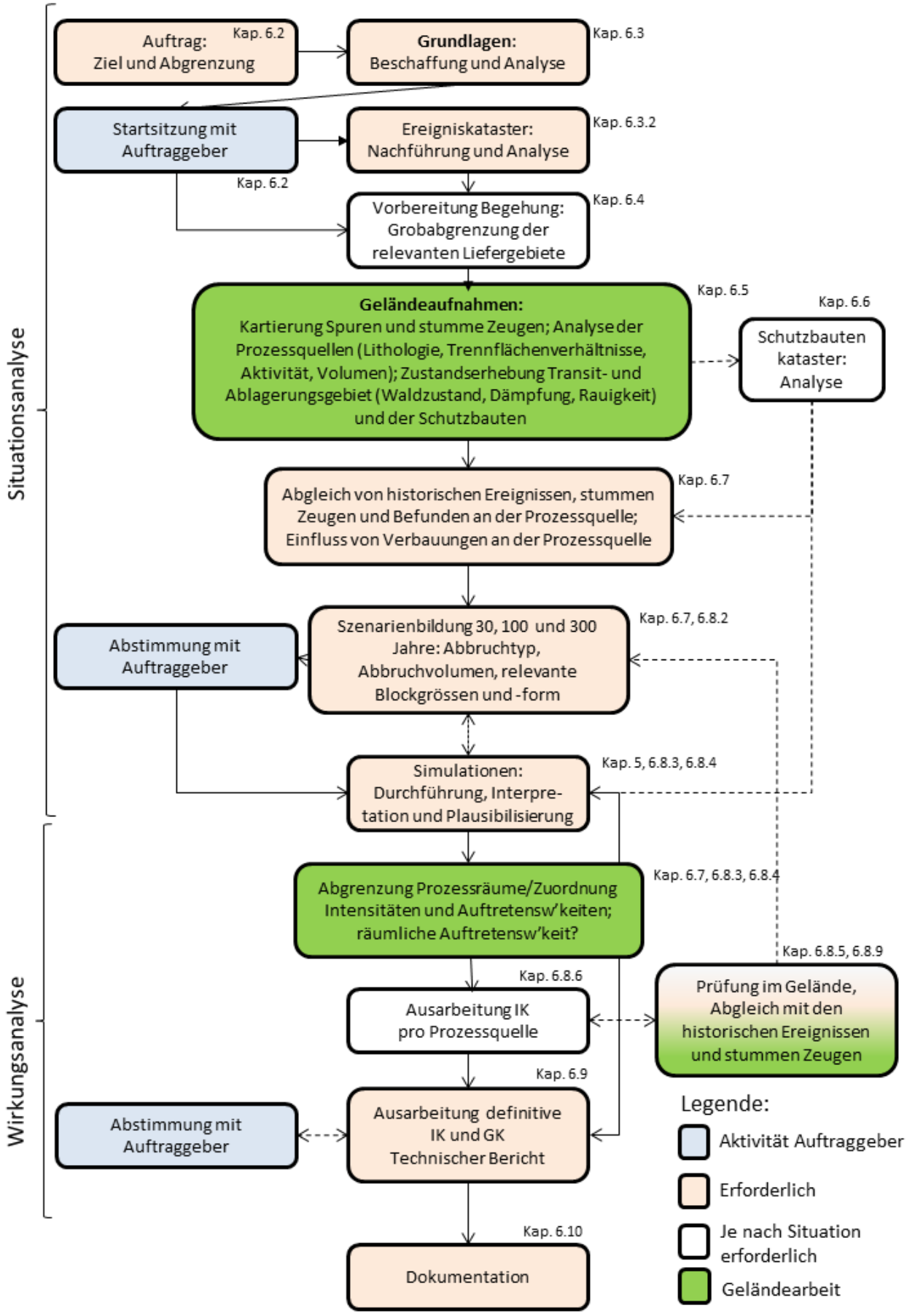


Abbildung 8: Übersicht über die Methodik und die grundlegenden Arbeitsschritte einer Gefahrenbeurteilung "Sturz».

5 Überblick Simulationsmodelle

5.1 Allgemeine Anforderungen an / Bemerkungen zu Simulationsmodellen

Es gibt heute kein Standardmodell in der Schweiz, um Reichweite und Einwirkungen von Sturzprozessen zu berechnen, sondern eine Vielzahl auf dem Markt erhältlicher Programme. Im Folgenden werden keine spezifischen Modelle vorgestellt oder beworben, sondern Grundsätze und mögliche Problempunkte aufgezeigt. Zudem gibt es auch einfache Berechnungsansätze, die – je nach Begebenheiten und Fragestellung – durchaus ihren Platz im «Methodenkoffer» haben (Kap. 6.8.3). Die nachfolgenden Aspekte sowie zusätzliche Erläuterungen zum Thema werden im Merkblatt des BAFU (2021, in Vorbereitung) detailliert behandelt.

Jede Modellierung stellt nur eine Annäherung an die in der Natur ablaufenden Prozesse dar. Ein Modell soll also die massgebenden physikalischen Prozesse (fallen, springen, rollen, gleiten) adäquat abbilden und die massgebenden Inputparameter (Geländeform, Dämpfung, Rauigkeit, Wald, Blockform und -grösse) berücksichtigen können. Die Modellierung erfolgt entweder entlang vorgegebener Sturzbahnen (zweidimensional 2D) oder flächig auf der Basis eines digitalen Terrainmodells (dreidimensional, 3D). Berechnet werden Trajektorien, Sprunghöhen, Geschwindigkeiten und Energien von Einzelblöcken. Block-Block-Interaktionen oder auch das Zerbrechen von grösseren Felsmassen in Einzelblöcke kann mit den heute auf dem Markt erhältlichen Programmen nicht abgebildet werden.

In Rovina et al. (2011) ist das allgemeine Vorgehen bei der Durchführung von Sturzmodellierungen beschrieben (Abb. 9).

Unabhängig vom verwendeten Modell müssen die relevanten prozessbeeinflussenden Parameter im Schritt 1 (Dämpfung, Rauigkeit, Wald) im Gelände erhoben werden, allenfalls unterstützt durch eine automatische Vorausscheidung aus bestehenden Geobasisdaten. Sie sind räumlich genügend genau abzugrenzen, so dass z. B. ein hindernisfreies Couloir vom umliegenden Transitgebiet mit höheren Rauhigkeitswerten und einem dichteren Baumbestand unterschieden werden kann.

Im Idealfall kann im Schritt 4 eine erste Sturzmodellierung für ein im Gelände beobachtetes und gut dokumentiertes Ereignis durchgeführt werden (zum Beispiel Sprungweiten, -höhen, Einschlag- und Absprungwinkel). Dabei werden die Eingabeparameter so geeicht, dass mit dem Berechnungsmodell die Beobachtung(en) nachvollzogen werden können. Es empfiehlt sich, diese Plausibilitätsprüfung unter Verwendung einer möglichst geringen Parametervariation durchzuführen. Wenn die Parameter so kalibriert werden konnten, werden die anderen Szenarien dieses Liefergebietes modelliert und auch wieder auf ihre Plausibilität hin überprüft.

Anzahl Simulationen: Verschiedene Versuche in der Natur haben gezeigt, dass nur schon eine sehr kleine Variation in den Ausgangsbedingungen (Blockform und Grösse) zu sehr unterschiedlichen Verläufen entlang einer Sturzbahn führen (Berger, 2004). Die Simulationsprogramme arbeiten in der Regel mit Zufallsvariablen / Streuung der verschiedenen Eingabeparameter, um der Variabilität der Natur (Blockformen, Heterogenität des Untergrunds, Zufälligkeit beim Auftreffen auf Hindernisse usw.) besser gerecht zu werden. Je nach Programm kann die Variationsbreite von mehr oder weniger Parametern manuell verändert werden oder ist programmspezifisch vorgegeben. Um statistisch signifikante Ergebnisse zu erzielen, sind mindestens 100 Modelldurchgänge pro Ausbruchzelle erforderlich (Rovina et al., 2011).

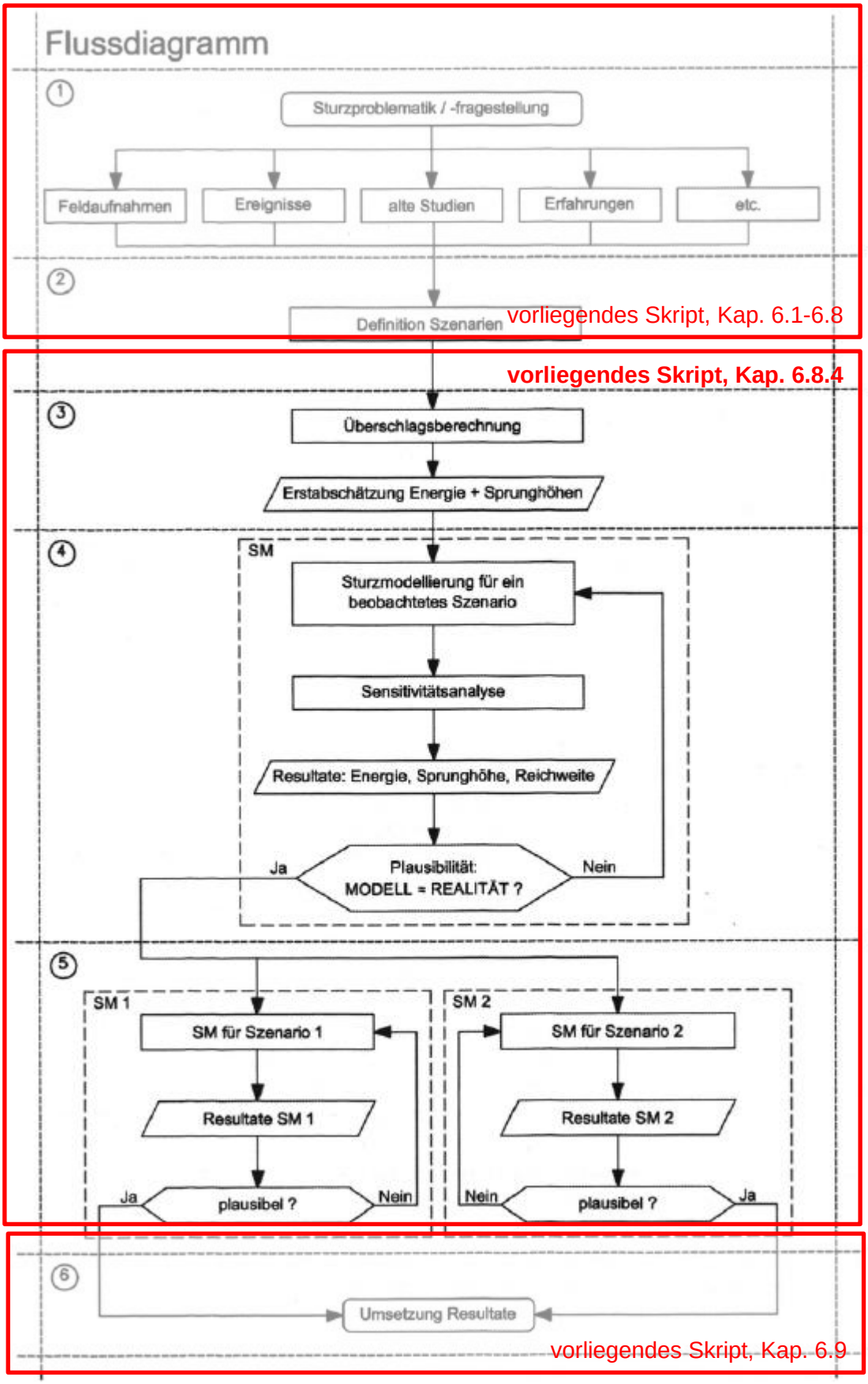


Abbildung 9: Allgemeines Vorgehen bei Sturzmodellierungen, angepasst nach Rovina et al. (2011).

Als Resultatoutput liefern die meisten Programme Energiewerte (aufgeteilt in Translations- und Rotationsgeschwindigkeit), Geschwindigkeiten, Sprunghöhen sowie statistische Auswertungen / Möglichkeiten zur Auswertung entlang des ganzen Transitgebietes oder an ausgewählten Punkten. Die dabei gelieferten Resultate in Form von statistischen Kennwerten können aber nicht von Programm A zu Programm B direkt verglichen werden. Deswegen kann hier auch keine Empfeh-

lung gemacht werden, welcher Perzentil-Wert zur Festlegung der Energie verwendet werden soll oder ob die Grenze der Gefahrenzone bis zum äussersten Punkt einer modellierten Ablagerung gezogen werden soll oder nur bis zum Rand, den 90% oder 95% der Steine erreichen.

Eine bisher ungeklärte Frage ist bei allen Programmen, wie mit grossvolumigen Abbrüchen und deren Fragmentierung in kleinere relevante Einzelblöcke umgegangen werden soll. Programmspezifisch gibt es verschiedene "Krücken" dazu (z. B. Erhöhung der Startgeschwindigkeit, Starthöhe), die Physik der Block-Block-Interaktion wie auch die Tatsache, dass kleine Blöcke "zu viel" Energie von oben mitnehmen wird damit aber nur ungenügend abgebildet.

5.2 2D- und/oder 3D-Simulationsmodelle?

5.2.1 2D-Simulationsmodelle

Bei der Anwendung von 2D-Simulationsmodellen ist besonders zu beachten:

- Geländeprofile für 2D-Sturzmodellierungen können sehr einfach (und auch automatisiert) aus bestehenden digitalen Geländemodellen herausgezogen werden. Sollen aber die Vorteile von 2D-Modellierungen genutzt werden, sind Nachbearbeitungen von automatisch generierten Geländeprofilen notwendig (präzise Abbildungen von Geländeknicks bei Strassen, Dämmen usw., Bruchkanten, Sprungschanzen).
- Die Wahl (Anzahl und Lage) der Profillinien ist entscheidend und beeinflusst die Qualität der Gefahrenbeurteilung massgeblich:
    - Lage: Die Profile sollen entlang von realistischen Sturzbahnen (in der Falllinie) liegen. Die Profile sollen so gewählt werden, dass die Gefährdung an ausgewählten Stellen (z. B. bei grösserem Schadenpotenzial) genau bestimmt werden kann und dass die sich lokal verändernden Gegebenheiten (Topographie, Wald, Bodeneigenschaften) berücksichtigt werden können. Allenfalls sind mehrere Profile notwendig, um direkte, wahrscheinliche, mögliche und unwahrscheinliche Fälle auch quantitativ abbilden zu können.
    - Anzahl: Es sind genügend Profillinien zu legen, um eine flächige Abgrenzung der Gefahrengebiete zu ermöglichen. Zwischen den Profillinien kann z. B. mittels Pauschalgefällemethode (Gerber, 1994) interpoliert werden.
- Die relevanten Bodenparameter müssen im Gelände erhoben werden. Deren Abbildung als numerische Werte ist programmspezifisch.
- Bei verschiedenen Programmen können Schutzmassnahmen als Auffanglinien mit einer spezifischen Höhe und Aufnahmeenergie abgebildet werden.
    - Zu beachten ist, dass in den Modellen der Block als Massenschwerpunkt modelliert wird. Demnach entspricht die Sprunghöhe der Höhe des Massenschwerpunktes. Blöcke mit Sprunghöhe gleich der Netzhöhe (Netzoberkante) werden deswegen in den Modellen zurückgehalten, auch wenn in der Realität ein solcher Block aufgrund der Rotationsenergie das Netz überwinden würde. Dieser Umstand ist durch eine angepasste Wahl der Netzhöhe im Modell zu berücksichtigen.
    - Auch dem Umgang mit der Restenergie bei modellierten Netzdurchschlägen muss programmspezifisch Beachtung geschenkt werden.
- Die Geländetopographie bei Dämmen kann angepasst werden (siehe oben). Zurzeit gibt es aber nur ein Programm, das die Aufnahmeenergie von Dämmen und auch das Freibord im Modell berechnet. Hier bedarf es in der Regel spezifischer Überlegungen und zusätzlicher Berechnungen, um die Wirkung der bestehenden Schutzbauten angemessen berücksichtigen zu können.
- Mit der Wahl des Startbereiches wird unter anderem auch die Anfangsfallhöhe festgelegt. Je nach geologischen Begebenheiten kann es deswegen sinnvoll sein, dass nur bestimmte Bereiche einer Felswand als relevante Startzone ausgeschieden werden.

5.2.2 3D-Simulationsmodelle

Bei der Anwendung von 3D-Simulationsmodellen ist besonders zu beachten:

- Die Wahl eines geeigneten und aktuellen Geländemodells ist zentral. Die Rastergrösse ist je nach Simulationsmodell und Fragestellung 2x2 bis 10x10 m zu wählen.).
- Das Geländemodell muss vor der Anwendung überprüft werden (visuell z. B. mittels Hillshade, Ansichten der Hangneigungen, Höhenlinien); allenfalls sind an geeigneten Stellen Kontrollprofile zu legen.
- Es ist zu prüfen, ob und wie Gebäude im Modell abgebildet werden sollen. Allenfalls sind die im Terrainmodell vorhandenen Senken zu füllen.
- Geländeknicke (Strassen, Mauern, Dämme; Berücksichtigung von kleineren Geländestrukturen) werden im Rastermodell geglättet. Eine Nachbearbeitung ist nur bedingt möglich und aufwändig.
- Bezüglich Bodenparameter, Umgang mit Schutzbauten und Wahl des Startbereichs sind dieselben Punkte zu beachten wie für 2D-Modellierungen (siehe Kapitel 5.2.1).

Im Anhang 1 findet sich ein Überblick über die verfügbaren Steinschlagmodelle.

5.3 Notwendige Inputparameter

Die verschiedenen Modelle unterscheiden sich teilweise erheblich in der Eingabe der notwendigen Parameter, der zu Grunde gelegten Berechnungsvorgänge wie auch der erzeugten Modelloutputs. Folgende Parameter müssen / können definiert werden:

- Blockeigenschaften: Blockform; Dimensionen (Kantenlängen; Radius, Höhe; Blockachsen); Dichte.
- Startpunkt: Punkt oder Bereich (deterministisch oder probabilistisch); Startgeschwindigkeit (inkl. Streuungsintervall).
- Sturzbahn: Bei 3D-Simulationen ergibt sich diese aus der Modellierung; bei 2D-Modellen ist diese durch die Wahl der Profillinie vorgegeben.
- Geländeparameter entlang der Sturzbahn: Festlegung der Werte (inkl. Streuungsintervall) für die Dämpfung und die Rauigkeit pro Abschnitt entlang des Profils (2D) oder flächig für jede Rasterzelle im Modellierungsperimeter (3D).
    - Die Eingabe der Dämpfung erfolgt über Gleit- und Haftreibungswinkel, normale und tangentiale Restitutionsfaktoren, elastische Eigenschaften des Bodens oder indirekt über die Ansprache eines vorgegebenen Bodentyps.
    - Der Rauigkeit wird unterschiedlich Rechnung getragen: als Funktion des Radius des simulierten Blocks, als Höhenklassen oder als qualitative Abstufung. Teilweise ist aber auch nicht ganz klar, wie die Rauigkeit berücksichtig wird. Zudem wird bei hoch aufgelösten Geländemodellen ein Teil der Rauigkeit schon über das Geländemodell abgebildet.
- Wald: Die Wirkung des Waldes wird nur bei einigen Programmen durch Baumtreffer quantifiziert. Dafür müssen die Stammzahl resp. Bestandesdichte, der Baumdurchmesser und die Baumart erfasst werden. Bei den übrigen Programmen muss der Waldeinfluss indirekt über andere Parameter (Dämpfung, Rauigkeit) approximiert werden.
- Schutzbauwerke: siehe Kapitel 6.6

Die grosse Schwierigkeit bei der Modellierung liegt in der Definition und Gewichtung der Eingabeparameter. Hier ist die Erfahrung des Bearbeiters zentral, denn im Gegensatz zu manchen anderen Naturgefahrenprozessen ist bis heute eine zuverlässige Parameteransprache schwierig. Ebenso kann es hilfreich sein, wenn die Beurteilung im Gelände und die Modellierung von derselben Person durchgeführt werden.

6 Vorgehen Gefahrenbeurteilung im Detail

6.1 Einleitung

Die folgenden Angaben stellen die wichtigsten Punkte dar, die bei einer Gefahrenbeurteilung von Sturzprozessen typischerweise relevant sind. Je nach Ausgangslage, zu beurteilendem Problem oder Auftrag können auch weitere Punkte dazukommen oder gewisse Abklärungen entfallen. Es empfiehlt sich, vorgängig die in den verschiedenen Kantonen geltenden Praktiken, Weisungen oder Richtlinien zu konsultieren.

6.2 Auftrag

Dem Auftragnehmer muss der Inhalt des Auftrags, die zu bearbeitenden Punkte und die erwarteten Resultate klar sein.

Klären von:

- Grund / Anlass für Gefahren(neu-)beurteilung: Ereignis, Neubeurteilung, Revision, Perimetererweiterung, Massnahmenplanung, Bauprojekt, usw.
- Zielsetzung / Bearbeitungsstufe / Massstab: Gefahrenhinweiskarte, Gefahrenkarte, Detailstudie bzw. Bauprojekt
- Projektperimeter
- Relevantes Schadenpotenzial => Perimeter Schadenpotenzial: klären und definieren
- Koordination mit anderen sicherheitsverantwortlichen Stellen (Strasse, Bahn, KW- und sonstige Anlagenbetreiber); Umgang mit Prozessen, die über den Perimeterrand hinausgehen;
- Bestehende Grundlagen (zu bestehenden Schutzmassnahmen, zu Ereignissen, frühere Beurteilungen, Objektschutzgutachten) / Gebietskenner inkl. Naturgefahrenberater / Grundlagen anderer sicherheitsverantwortlicher Stellen
- Methodische Vorgaben (z. B. bezüglich zu verwendender Simulationsmodelle 2D- oder 3D, Anzahl Profillinien usw.)
- Erwartete Produkte
- Terminplan / Abhängigkeiten mit anderen Projekten
- Widersprüche in den formulierten Erwartungen
- Allenfalls sinnvolle Ergänzungen
- Qualitätssicherung
- Finanzielle Aspekte

6.3 Grundlagen inkl. Ereigniskataster

Die für die Auftragserfüllung relevanten Grundlagen müssen verfügbar sein resp. es muss klar sein, wo diese beschafft werden können. Die Auswertung derselben erlaubt eine erste Einschätzung und erleichtert die zielgerichtete Auftragsbearbeitung. Gegebenenfalls müssen die fehlenden Grundlagen im Rahmen des Auftrags erarbeitet werden (z.B. Ereigniskataster, Schutzbautenkataster).

6.3.1 Grundlagenbeschaffung

Grundlagendaten

- Topographische Grundlagen (Übersichtsplan, TLM, evtl. weitere aktuelle Kartengrundlagen, Orthofotos, alte Orthofotos und alte LK)

- Digitale Höhenmodelle (DTM und DOM in gewünschter Auflösung und davon abgeleitete Produkte)
- Grundlagen zur Bodenbedeckung und zum Wald (wenn möglich digital und georeferenziert)
- Geologische Grundlagen (geol. Karten, in der Regel im Massstab 1:25'000, Geocover)

Gefahrengrundlagen

- Gefahrenhinweiskarten (M1) inkl. Bericht zum Vorgehen
- Bestehende Gefahrenbeurteilungen (Gefahrenkarten inklusive dazugehörige Berichte, Objektschutzgutachten, Beurteilungen anderer Infrastrukturbetreiber usw.)
- Ereigniskataster (Geodaten und Katasterblätter, wenn möglich auch Aktennotizen, Fotos usw.) => allenfalls Ereigniskataster erstellen bzw. bestehender Kataster bei Bedarf ergänzen
- Grundlagen zu bestehenden Schutzmassnahmen (Projektakten, Dimensionierungsgrundlagen, Abschlussakten, Kontroll- und Unterhaltspläne)
- Besprechung mit ortskundigen Gefahrenfachleuten (Strassenmeister, Forstbetriebe, Naturgefahrenbeobachter, etc.)

Grundlagen zum Schadenpotenzial

- Zonennutzungsplan, kommunale Richtpläne, …
- Infrastrukturpläne (Versorgung, Verkehr, …)
- Sonderobjekte …
- Geplante Projekte und Bauvorhaben
- Usw.

6.3.2 Grundlagenauswertung

Die Auswertung der Grundlagen erlaubt die Erarbeitung eines konzeptionellen Modells und vorläufige Abgrenzung der Systemkomponenten.

Grundlagendaten

- Abgrenzung des Perimeters mit den relevanten Schadenpotenzialen
- Wo sind Auslösebereiche für Sturzprozesse (Felssignatur, Hangneigungskriterium (i. d. R. Hänge >50°), Ursprungsbereiche von historischen Ereignissen) mit welchen geologischen Grundvoraussetzungen
- Vorausscheidung der relevanten Liefergebiete und von solchen, die den Perimeter Schadenpotenzial voraussichtlich nicht tangieren (Methode: Grobmodellierung, Gefahrenhinweiskarte, Pauschalgefälle)
- Auswertung der Grundlagen zur Bodenbedeckung und Wald => auf eine für die Modellierung angepasste Form
- Festlegen des Modellierungsperimeters resp. der Profillinien
- Erste Beurteilung der Wirkung der bestehenden Massnahmen

Ereigniskataster

- Datum, Ausbruchstelle (Liefergebiet?), Grösse des Ausbruchs (Volumen, Blockgrössen), auslösendes Moment, Schadenstelle, Ort der Ablagerung, Blockgrösse bei der Ablagerung, Art der Schäden, Prozesscharakteristik im Transitgebiet (Sprungweite und -höhen)
- Wenn genügend Ereignisse dokumentiert sind, können diese auch statistisch ausgewertet werden (**siehe Extremwertstatistik im Modul Grundlagen**)

6.4 Vorbereitung Begehung

Bei einer guten Vorbereitung im Büro kann eine Geländebegehung effizient durchgeführt werden ohne wichtige Punkte zu vergessen.

- Auswahl der zu beurteilenden Liefergebiete; für welche ist eine Gegenhangansicht vorgängig sinnvoll? Von wo aus?
- Feldkarten (oder entsprechende Grundlagen auf einem Feldtablett) als Kartiergrundlage und mit allen relevanten Grundlageninformationen
- Wie komme ich dorthin? Strassen, Wege, Helikopter,?
- Welche Ausrüstung brauche ich (inkl. Sicherheitsausrüstung)? Arbeiten am Seil?
- Besondere Gefahren (neben Steinschlag?): Bahn, Strassen, …
- Wetter und Jahreszeit
- Was nehme ich mit: Kartiergrundlage, Feldstecher, Fotoapparat, GPS, Kompass, Massband, Laserdistometer, Feldbuch oder –formulare, Drohnen?
- Begleitung: Bürokollege –kollegin (auch aus Sicherheitsgründen), Förster, lokaler Naturgefahrenberater, ….

6.5 Durchführung Begehung

Mit der Geländebegehung werden wichtige, für die Beurteilung relevante Daten erhoben. Weiter liefert die Begehung eine weitere Einschätzung der Gefährdung und hilft, die im Studium der Grundlagen gewonnenen Erkenntnisse zu verifizieren und zu vertiefen. Die dabei gewonnenen Geländekenntnisse helfen, die spätere Simulation zu überprüfen. Eine Geländebegehung mit ausführlichen und detaillierten Beobachtungen ist unverzichtbar und eine Voraussetzung für eine qualitativ gute Gefahrenbeurteilung. Für diese entscheidende Arbeitsetappe muss genügend Zeit zur Verfügung stehen und auch so im Auftrag vorgesehen werden.

- Geologische Verhältnisse im Abbruchgebiet (Lithologie, relevante Trennflächen, Auflockerung, hauptsächliche Auslöse- und Abbruchmechanismen)
- Einfluss- und Auslösefaktoren im Abbruchgebiet, inkl. hydrogeologische Verhältnisse oberhalb und im Abbruchgebiet
- Spuren frischer Abbrüche in der Felswand (Grösse, relevante Trennflächen)
- Aufnahme der Gefahrenpotentiale (potenzielle Abbruchkörper, diffus/punktuell) mit Darstellung; Abschätzung zur Fragmentierung während des Sturzweges
- Stumme Zeugen im Transit- und Ablagerungsgebiet:
    - Abgelagerte Blöcke und hinter Hindernissen und Schutzbauten gestoppte Blöcke (Lage, Alter, Hauptdimensionen, Form, Lithologie)
    - Sturzspuren am Boden (Alter, Grösse, Sprungweiten)
    - Sturzspuren an den Bäumen (Häufigkeit, Grösse, Höhe)
    - Schäden im Asphalt und an Leitplanken und anderer Infrastruktur
    - allenfalls Frequenzanalyse für stumme Zeugen (Abb. 10), z. B. hinter Auffanglinien, oder aufgrund von Schäden an Bäumen (z. B. Dendrogeomorphologie)
- Erfassung und Beurteilung bestehender Schutzmassnahmen inkl. Wald
- Erfassung der für die Modellierung relevanten Parameter (programmspezifisch; siehe **Anhang 1**)
- Darstellung der Ergebnisse auf einer Karte der Phänomene; Feldformularen pro Liefergebiet, Dokumentation in den Prozessquellen-Factsheets ("Szenarienblätter")



Abbildung 10: Stumme Zeugen vergangener Sturzaktivität (© Klaus Louis)

6.6 Schutzbautenkataster

Die bestehenden Schutzmassnahmen im beurteilten Gebiet und ihre Wirkung auf den Prozessablauf sind bekannt.

- Was und wo?
- Unterteilung von Massnahmen im Anrissgebiet und solchen im Transit- und Ablagerungsgebiet
- Hauptdimensionen: Anzahl, Länge, Breite, Höhe, Geometrie (Dämme)
- Projektgrundlagen, Dimensionierungs- und Bemessungsgrundlagen
- Energieaufnahmekapazität
- Alter und Zustand => visuelle Beurteilung
- Beurteilung nach Protect (Romang 2008)

6.7 Zusammenfassung der Erkenntnisse pro Liefergebiet und Szenarienbildung

Die für die Gefahrenbeurteilung relevanten Charakteristika des Liefergebietes sind erkannt und zusammengefasst. Sie erlauben die Beschreibung von möglichen Abbruchszenarien und die Formulierung von Szenarien (Blockgrössen pro Eintretenswahrscheinlichkeit) für die nachfolgende Wirkungsbeurteilung.

Zusammenfassung pro Liefergebiet von

- Historischen Ereignissen (Wiederholbarkeit?), stummen Zeugen (Grösse, Häufigkeit, räumliche Verteilung), Geologische Verhältnisse im Abbruchgebiet (Lithologie und Trennflächenverhältnisse, Auflockerung, Spuren frischer Abbrüche, Abbruchmechanismus und -ursachen)
- Allenfalls Frequenzanalyse
- Umgang mit Schutzbauten im Anrissgebiet => Protect (Romang 2008)

Szenarienbildung

- Räumliche Abgrenzung und räumliche Unterteilung der Liefergebiets in homogene Bereiche, aus welchem Sturzprozesse erwartet werden
- Je nach Fragestellung macht es Sinn, eine Untergrenze in der Grösse / Höhe der beurteilten Liefergebiete und Felsböschungen zu definieren.

- Je nach Fragestellung sind die relevanten Eintretenswahrscheinlichkeiten festzulegen. Für die Gefahrenkarten werden analog zu den Wiederkehrperioden für Hochwasser und Lawinenprozesse (30-, 100-, 300- und > 300-jährlich) die folgenden Eintretenswahrscheinlichkeiten definiert: 0.033, 0.01, 0.003, < 0.003. Für Gefahrenhinweiskarten wird in der Regel keine Eintretenswahrscheinlichkeit festgelegt oder eine solche die im Bereich 0.01 bis 0.003 liegt. Für Massnahmenstudien können auch weitere Eintretenswahrscheinlichkeiten relevant sein.
- Pro Eintretenswahrscheinlichkeit festlegen von:
    - relevante Abbruchursache (Lithologie, Trennflächen, Wurzeldruck, hydrstatischer Druck, Frost-Tau, usw.)
    - Abbruchtyp (Einzelblock, mehrere Blöcke, kleinerer bis grösserer Felssturz, Bergsturz), relevante Gefahrenpotenziale
    - Einfluss von allfälligen Schutzmassnahmen im Anrissgebiet
    - Abbruchvolumen und -form
    - evaluieren; erwartete Fragmentierung im Transitgebiet
    - allenfalls relevante Sekundärprozesse
    - relevanter Bemessungsblock für die Wirkungsbeurteilung (Hauptdimensionen, Form, Rundung, Lithologie). Zu dessen Bestimmung werden folgende Eingangsgrössen berücksichtigt: Trennflächengefüge, Auflockerung und Lithologie im Anrissgebiet, Abbruchmechanismus und erwartete Abbruchkörper (Volumen und Form), Fragmentierung im Transitgebiet, stumme Zeugen und historische Ereignisse. Sind genügend historische Ereignisse dokumentiert oder können stumme Zeugen hinter einer definierten Auffanglinie (z. B. Netz, Damm) zeitlich genügend genau eingegrenzt werden, so können die Blockgrössen auch mittels statistischer Verfahren (siehe Exkurs Extremwertstatistik im Grundmodul) angenähert werden. Hintergründe dazu finden sich auch in Corominas et al. (2017):
- Bei der Festlegung des Bemessungsblocks ist zu beachten, dass die auf der Höhe des Schadenpotenzials relevante Blockgrösse bestimmt werden muss. Diese ist oft kleiner als das Abbruchvolumen oben in der Felswand.
- Je nach lokalen geologischen Verhältnissen müssen innerhalb eines Liefergebietes Zonen mit unterschiedlichen Blockgrössen pro Szenario definiert werden.

Sekundärsteinschlag: Eine klare Handhabung fehlt. Oft wird Sekundärsteinschlag nur dort ausgeschieden, wo es durch historische Ereignisse / entsprechende Geländephänomene belegt ist; die Blockgrössen werden je nach Geländegegebenheiten und historischen Ereignissen bestimmt.

Extremereignisse *können nicht mit Statistik begründet werden, sondern mit Veränderungen in der geologischen Disposition. Extremereignisse sollten durch klare Anzeichen im Gelände auf sich abzeichnende grossvolumige Abbrüche belegt sein. Beim Rückschluss auf (prä-)historische Grossereignisse im Gebiet muss kritisch hinterfragt werden, ob die geologische Disposition dafür immer noch gegeben ist (z. B. Talentlastung nach letzteiszeitlichem Gletscherrückzug). Auf der anderen Seite muss v. a. im alpinen Raum der Gletscherrückzug und die Degradation des Permafrosts als Veränderung in der Disposition berücksichtigt werden.*

6.8 Wirkungsbeurteilung und Ausarbeitung Intensitätskarte pro Prozessquelle

Mit der Wirkungsbeurteilung werden die gefährdeten Gebiete pro Eintretenswahrscheinlichkeit und Liefergebiet ausgeschieden und nach Massgabe der auftretenden Energie in unterschiedliche Intensitätsklassen unterteilt. Dafür stellen Sturzsimulationen ein unverzichtbares Hilfsmittel dar. Deren Ergebnisse müssen immer plausibilisiert und anhand der historischen Ereignisse und der stummen Zeugen verifiziert werden. Die Ergebnisse der Wirkungsbeurteilung werden als Intensitätskarte pro Eintretenswahrscheinlichkeit dargestellt.

6.8.1 Allgemeines

Die Wirkungsbeurteilung hat zum Ziel, den potenziellen Ablagerungsraum sowie die dort zu erwartenden Einwirkungen (Energie der Sturzkörper [kJ]) zu bestimmen. Eine weitere wichtige Prozessgrösse im Transit- und Ablagerungsraum ist die Sprunghöhe der Sturzkörper [m] (und die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit mit Blick auf spätere Risikoanalysen).

Die Wirkungsbeurteilung wird für jedes Liefergebiet und jede Eintretenswahrscheinlichkeit separat durchgeführt. Es kommen Simulationsmodelle, Berechnungen, Pauschalgefälle und Geländebeobachtungen sowie Erfahrungen aus ähnlich gelagerten Fällen zum Einsatz. Die Beurteilung berücksichtigt den aktuellen Zustand (Gelände, Waldzustand und Querbäume, Wirkung Schutzbauten gemäss Protect (Romang, 2008), andere Bauwerke.

Die Abstufung der Intensität innerhalb der Wirkungsräume erfolgt nach den Kriterien gemäss BAFU 2016 (E = kinetische Energie [kJ]):

6.8.2 Abgrenzung der Intensitätsstufen (30 und 300 kJ)

Die kinetische Energie [kJ] einer Sturzkomponente ist die massgebende Grösse zur Bestimmung der Einwirkungen auf ein Schadenpotential sowie auch für die Abgrenzung der Intensitätsstufen in der Gefahrenkartenerstellung. Beim Aufprall von Steinen/Blöcken ist mit folgenden Schadenbildern zu rechnen (gemäss BAFU 2016):

Schwache Intensität (<30 kJ)

- Löcher im Mauerwerk oder in Strassenbelägen.
- Menschen und Tiere sind innerhalb von Gebäuden nicht gefährdet, ausserhalb von Gebäuden jedoch schon. Ein Kopftreffer kann tödliche Folgen haben.

Mittlere Intensität (30-300 kJ)

- Je nach Bausubstanz: grössere Schäden an Gebäudehülle; die Gebäudestabilität ist in der Regel jedoch nicht beeinträchtigt. Reparaturen sind im Allgemeinen mit verhältnismässigem Aufwand realisierbar.
- Menschen und Tiere können innerhalb von Gebäuden gefährdet sein.
- Menschen und Tiere sind ausserhalb von Gebäuden gefährdet.
- Strassen und oberirdische Leitungen können beschädigt und unterbrochen werden.

Starke Intensität (>300 kJ)

- Erhebliche Schäden an der Bauwerkstruktur, welche einen teilweisen oder totalen Einsturz zur Folge haben können. Die Kosten für Reparaturen sind meist unverhältnismässig hoch.
- Lebensgefahr für Menschen und Tiere innerhalb und ausserhalb von Gebäuden.
- Verschüttung, Beschädigung oder Zerstörung von Strassen.
- Oberirdische Infrastrukturanlagen (z. B. Strassen, Stromleitungen) können beschädigt und unterbrochen werden

Prozess	schwache Intensität	mittlere Intensität	starke Intensität
Stein- und Blockschlag, Eisschlag	E < 30 kJ	30 kJ < E < 300 kJ	E > 300 kJ
Felssturz	--	--	E > 300 kJ
Bergsturz	--	--	E > 300 kJ

6.8.3 Simulationen / Berechnungen / Abschätzungen

Simulationsmodelle (2D oder 3D, siehe Kapitel 5) bilden heute in der Regel eine unverzichtbare Hilfe für die Wirkungsbeurteilung. Ob dabei 2D oder 3D-Simulationen zum Einsatz kommen, hängt von der Fragestellung und den Anforderungen des Auftraggebers ab. Wichtig ist, dass im Perimeter Schadenpotenzial Reichweite und Energie genügend genau bestimmt werden können. Dementsprechend sind Anzahl und Lage der Steinschlagprofile zu wählen resp. der Modellierungsperimeter abzugrenzen (siehe auch Kap. 6.3.2). Es muss auch eine genügende Anzahl an Simulati-

onen durchgeführt werden, um im Perimeter Schadenpotenzial eine repräsentative Statistik machen zu können. Die Modellierungen werden pro Liefergebiet und pro Szenario durchgeführt. Weitere Ausführungen zu den Simulationen siehe Kapitel 5 und BAFU (2021, in Vorbereitung).

Pauschalgefällemethode

Bei einfachen Geländeverhältnissen (kurze und homogene Verhältnisse im Transit- und Ablagerungsgebiet) kann der Wirkungsbereich mit der Pauschalgefällemethode (Gerber, 1994, siehe Abb. 11) bestimmt werden. Die Sturzenergie bei senkrechten Böschungen kann nach der Methode des freien Falls ($E = m \times g \times h$) berechnet werden.

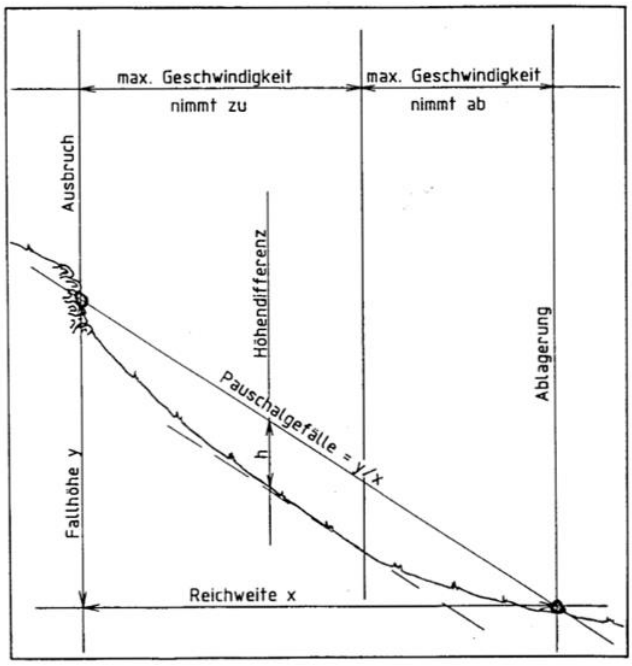


Abbildung 11: Schematisches Geländeprofil zur Berechnung der Reichweite und der Sturzenergie nach dem Ansatz des Pauschalgefälles (Gerber, 1994). Die Translationsenergie eines Blocks kann wie folgt angenähert werden: $E_t = 0.5 \times m \times v_e^2$, mit $v_e = 0.8 \times \sqrt{(2 \times g \times h)}$. h wird dafür gemäss obiger Darstellung aus dem Profil bestimmt. Um die Gesamtenergie zu berechnen muss noch die Rotationsenergie E_r hinzugezählt werden ($E_r = 0.2 \ldots 0.3 \times E_t$). Die Neigung des Pauschalgefälles y/x wird gemäss Tabelle 1 bestimmt.

Das Pauschalgefälle bezeichnet die Neigung der Verbindungsgeraden zwischen dem Entstehungs- und dem Ablagerungspunkt und kann für eine erste, grobe Abschätzung der Reichweite von Sturzprozessen hinzugezogen werden (Gerber, 1994). Allgemein gilt, dass Steine unter einem grösseren Pauschalgefälle abgelagert werden als Blöcke. Auch spielt die Steinform eine Rolle, weil kugel- oder würfelförmige Steine sich weiter hangabwärts bewegen als quader- oder plattenförmige. Bei der Betrachtung von denjenigen Formen der Steine und Blöcke mit der grössten Reichweite zeigt sich, dass sich grössere Blöcke und Grossblöcke unter einem Pauschalgefälle von ca. 65% ablagern. Kleinere Blöcke und Steine lagern sich im Minimum unter einem 5-10% grösseren Pauschalgefälle ab (Gerber, 1994).

Pauschalgefälle Widerstand	65% (entspricht 33°) Klein	70% (35°) mittel	75% (37°) gross
Steine	Vegetation: Wiese Unebenheiten: keine Boden: flachgründig	Vegetation: Baumholz Unebenheiten: klein Boden: tiefgründig	Vegetation: Stangenholz Unebenheiten: gross Boden: Hangschutt
Kleinere bis mittlere Blöcke	Vegetation. Stangenholz Unebenheiten: klein Boden: flachgründig	Vegetation: Baumholz Unebenheiten: gross Boden: tiefgründig	
Grössere Blöcke und Grossblöcke	Vegetation: Baumholz Unebenheiten: gross Boden: tiefgründig		

Tabelle 1: Generelle Kategorisierung zum Pauschalgefälle in Abhängigkeit von Stein- und Blockgrösse, Vegetation, Unebenheiten im Gelände und Bodenmächtigkeit (nach Gerber, 1994).

Anstelle von Pauschalgefälle wird gelegentlich auch der Begriff **Fahrböschung** (Heim, 1932) verwendet. Er bezieht sich auf das geometrische Gefälle bzw. die Neigung der Verbindungsgeraden des obersten Punktes der Ausbruchsstelle und des entferntesten Punktes der Ablagerung, gemessen entlang der Spur des Steinschlages (Trajektorie).

Im Gegensatz dazu bezieht sich der **Schattenwinkel** (Evans & Hungr, 1988) im Anriss auf die Unterkante der Prozessquelle. Der Schattenwinkel ist vor allem bei Felsstürzen eine Option, sofern diese aus steilen und hohen, im Horizontalprofil wenig gegliederten Felswänden auftreten können. Dabei verbindet man den äussersten Punkt des Ablagerungsgebietes mit dem Wandfuss durch eine Gerade. Deren Steigung beträgt mindestens 31.5°, kann jedoch bis 27.5° reichen.

Eine rein morphologische Abgrenzung der Wirkungsbereiche für Sturzprozesse (z. B. anhand von stummen Zeugen) ist heute nicht mehr zeitgemäss. Die morphologischen Anzeichen sollen aber unbedingt benutzt werden, wenn nötig auch unter Einbezug von alten Karten und Luftbildern, um die Modellierungsergebnisse zu plausibilisieren (siehe Kapitel 6.8.4).

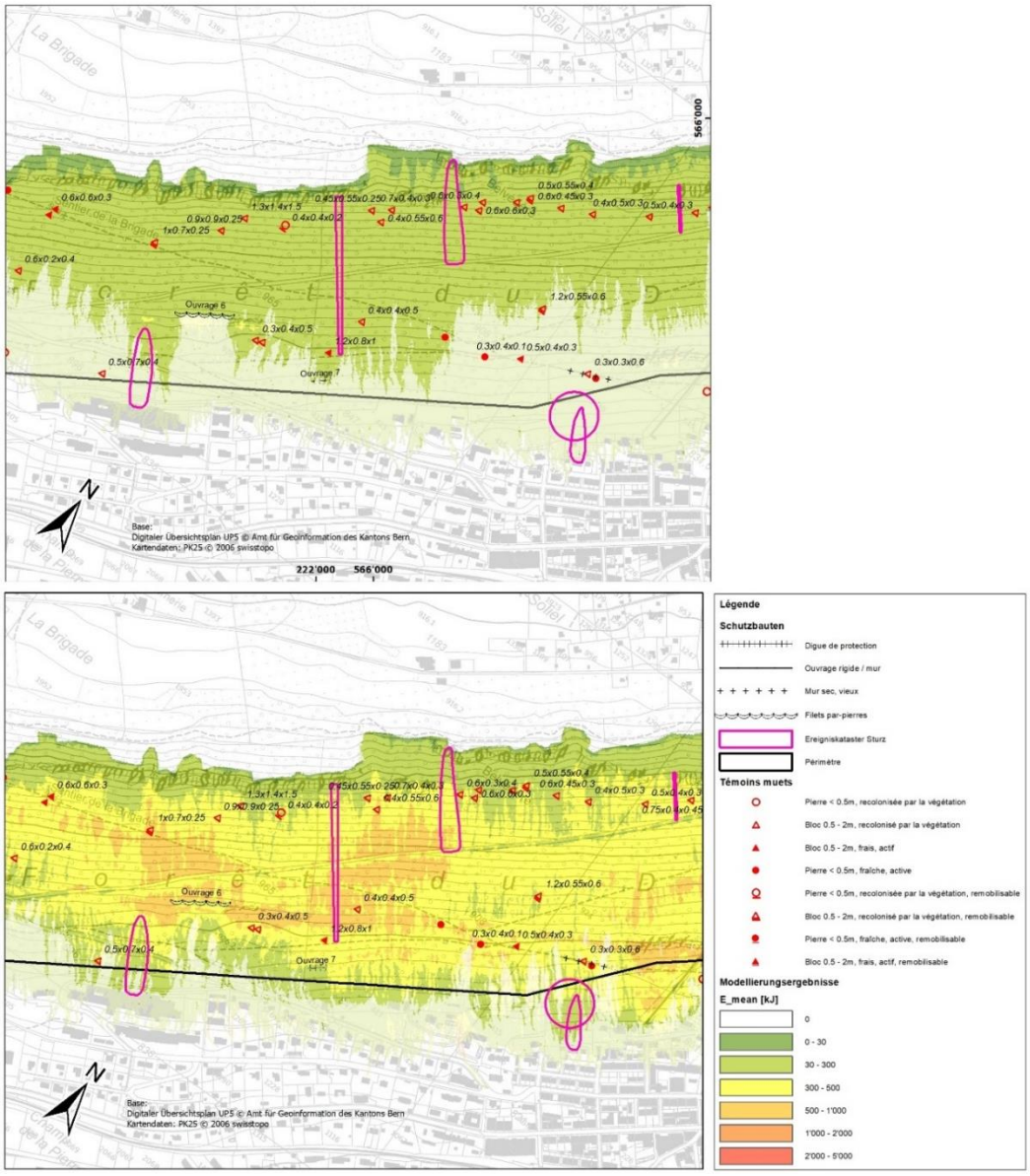


Abbildung 12: Beispiel für den Umgang mit Modellierungsergebnissen (dargestellt als Energiekarte). Oben Modellierung des 30-jährlichen Szenario, unten des 100-jährlichen Szenario. Beide wurden an den historischen Ereignissen (in pink) und den stummen Zeugen (Signatur gemäss Symbolbaukasten) geeicht. Diejenigen Bereiche der Modellierung, die "abgeschnitten" werden, sind in schwacher Farbe dargestellt (Quelle Impuls AG). Für die Umsetzung in eine Intensitätskarte müssen die Modellierungsergebnisse noch generalisiert und Trajektorien zusammengefasst oder auch abgeschnitten werden.

6.8.4 Plausibilisierung und Interpretation der Simulationsergebnisse

Unabhängig vom gewählten Modellierungsansatz müssen die erzielten Ergebnisse immer kritisch hinterfragt werden (siehe auch Kapitel 5 und Abb. 12):

- Sind die Resultate plausibel (Reichweiten, Energien, Sprunghöhen)? Abgleich mit einfachen Berechnungsformeln und Abschätzverfahren.
- Ist die Reichweite des häufigen Szenarios durch historische Ereignisse / frische stumme Zeugen belegt?
- Können historisch dokumentierte Ereignisse und stumme Zeugen genügend abgebildet werden (z. B. modellierte Sturzenergie vs. effektiv aufgetretene Schäden; modellierte Sprunghöhen vs. Schäden an Bäumen; modellierte Reichweite vs. Lage von alten stummen Zeugen)?
- Wie verhält sich die Simulation bei der Variation der Eingangsgrössen (Sensitivitätsanalyse)?
- Kann es am Ablagerungsrand zur Absplitterung von Grossblöcken kommen (grössere Reichweite aber geringere Masse)?
- Sind die Simulationsergebnisse stimmig mit Erfahrungen aus dokumentierten Ereignissen in ähnlichen geologischen und topographischen Verhältnissen? Ging etwas vergessen (im positiven wie auch im negativen Sinn)?

Die Simulationsergebnisse müssen weiter interpretiert und in flächig abgegrenzte Wirkungsbereiche im Perimeter Schadenpotenzial umgesetzt werden (Abb. 13). Ein an sich linear ablaufender Prozess wird als Umhüllende aller relevanten Sturztrajektorien flächig dargestellt.

Dabei genügt es nicht, die Resultate aus den Simulationen direkt als Intensitätskarten zu verwenden. Es braucht eine gutachterliche Interpretation der Simulationsresultate, die begründet und dokumentiert werden muss. Zudem müssen die Simulationsdaten generalisiert werden.

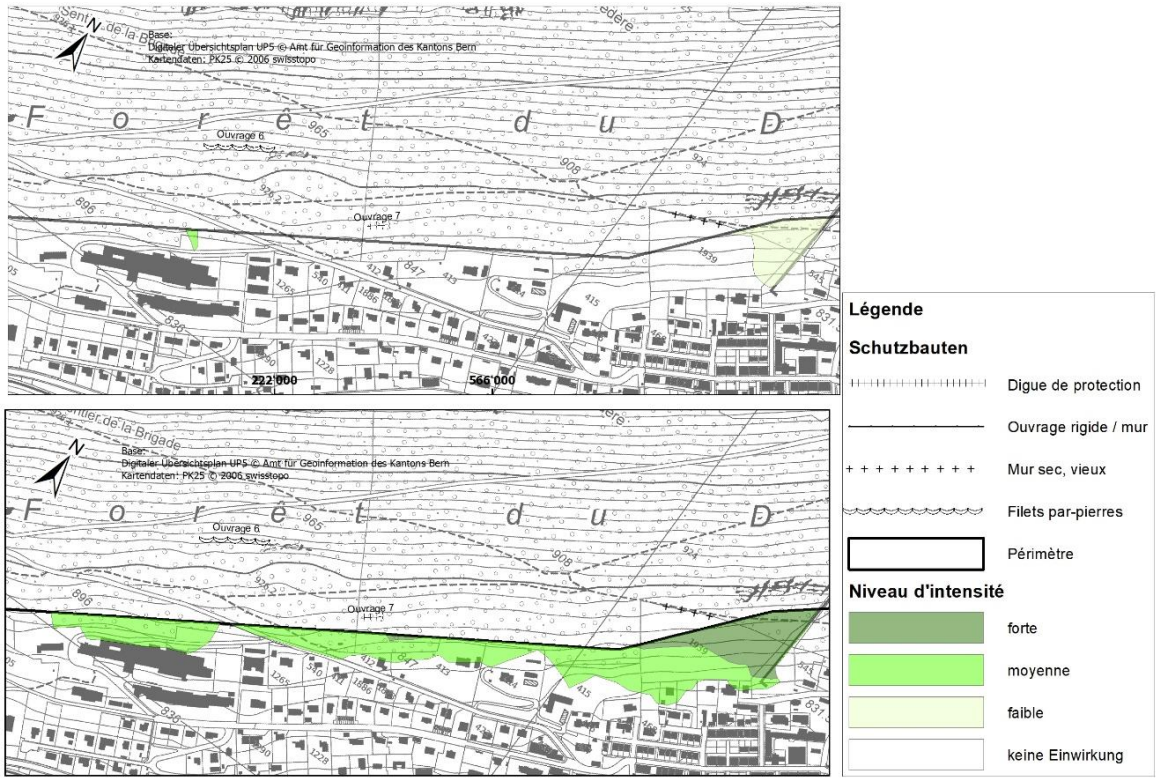


Abbildung 13: Intensitätskarten für das 30-jährliche Szenario (oben) und das 100-jährliche Szenario (unten) (Quelle Impuls AG). Der gewählte Ausschnitt entspricht in etwa demjenigen in Abbildung 12 mit der Darstellung der Modellierungsergebnisse.

Unabhängig vom gewählten Modell zu beachten ist dabei:

- Wie wird das Stillstand- / Abbruchkriterium gewählt und wie wird mit "statistischen Ausreissern" im Auslaufbereich umgegangen?
- Wie werden bestehende Schutzbauwerke in der Modellierung berücksichtigt?
    - Die Wirkung von Steinschlagnetzen können in der Regel gut in Simulationsmodellen nachgebildet werden. Besondere Beachtung ist der Sprunghöhe und der Werkhöhe zu schenken (Freibord?). Weiter muss bestimmt werden, welcher Perzentil-Wert als massgebend für die Tragsicherheit des Werks in einem Szenario angenommen wird. Zudem muss je nach Modell gutachterlich beurteilt werden, mit welcher Restenergie sich ein durchschlagender Sturzkörper fortbewegt. Auch wichtig in der Beurteilung ist das Auftreten von Mehrfachtreffern. Ist bei einem Szenario mit mehreren Blöcken zu rechnen, kann die Restnutzhöhe des Netzes nach dem Einschlag eines ersten Blocks ungenügend sein, um weitere Blöcke aufzufangen.
    - Die Wirkung von Schutzdämmen kann in den meisten Modellen nur näherungsweise in den Simulationsergebnissen abgebildet werden. Dort sind zusätzliche Überlegungen und Berechnungen notwendig (siehe auch BAFU, 2021: Projektierung von Steinschlagschutzdämmen. Merkblatt in Vorbereitung).
- Wurden andere bestehende Bauwerke (z. B. Häuser) im verwendeten Oberflächenmodell belassen? Welchen Einfluss haben diese im Auslaufbereich?
- Welcher Perzentil-Wert wird für die Abgrenzung der Intensitätsklassen gewählt?
- Gibt es relevante Geländeknicks / -kanten im Auslaufbereich (z. B. Strassen), die in den verwendeten topographischen Grundlagen nicht angemessen abgebildet sind?

Bei der Verwendung von 2D-Modellen muss zusätzlich die laterale Ausbreitung mit sehr grosser Aufmerksamkeit beurteilt werden (Interpolation zwischen zwei Profillinien, Kanalisierung, Ausbreitung über einen Fächer, Effekt von schräg zur Falllinie verlaufenden Geländestrukturen im Transitgebiet usw.).

6.8.5 Prüfung im Gelände

Die Plausibilität der ausgeschiedenen Wirkungsbereiche ist im Gelände zu überprüfen und allenfalls anzupassen. Zu beachten sind dabei insbesondere:

- Schlüsselstellen im Transitgebiet (z. B. Überspringen von Geländehindernissen)
- Wirkung von Schutzbauwerken
- Kleintopographie im Ablagerungsbereich
- Wirkung von Bauten und anderen Hindernissen im Transit- und Ablagerungsbereich
- Arrondierung der Grenzen des gefährdeten Gebietes

6.8.6 Ausarbeitung Intensitätskarte pro Prozessquelle.

Die Intensitätskarten (IK) werden basierend auf obigen Überlegungen erstellt. Dafür werden in den meisten Kantonen heute Intensitätskarten pro Prozessquelle und Eintretenswahrscheinlichkeit verlangt. Je nach Kanton werden darauf aufbauend sogenannt synoptische Intensitätskarten pro Eintretenswahrscheinlichkeit berechnet.

Wie die Wirkung von Schutzmassnahmen berücksichtigt wird, ist in Protect (Romang 2008) beschrieben. Die Umsetzung davon in Intensitäts- und Gefahrenkarten ist kantonal unterschiedlich geregelt.

In der Regel wird die Intensitätskarte nur für den Perimeter Schadenpotenzial erstellt. Ob ausserhalb davon z. B. die Prozessumhüllende pro Eintretenswahrscheinlichkeit zu bestimmen ist oder nicht muss mit dem Auftraggeber geklärt werden.

Die zu erfassenden Parameter in den digitalen Geo-Daten sind im Minimalen Geodatenbasismodell des Bundes (www.bafu.admin.ch/geodatenmodelle) beschrieben. Je nach Kanton bestehen noch weitere Vorgaben zur Erfassung der digitalen Geodaten.

6.8.7 Umgang mit Unsicherheiten

Bei Naturprozessen ist die Ermittlung von Intensitäten und Eintretenswahrscheinlichkeiten grundsätzlich mit Unsicherheiten verbunden (BAFU 2016). Zudem nehmen diese Unsicherheiten zu, sobald Ereignisse ausserhalb des bisherigen Erfahrungsbereichs liegen. Bei der Gefahrenbeurteilung haben die vorhandenen Unsicherheiten entsprechende Unschärfen in der Beurteilung zur Folge. Sie führen zu Ermessensspielräumen, die alle Akteure herausfordern.

Da es nicht möglich ist, alle potenziellen Ereignisabläufe vollständig abzubilden, gibt es immer wieder Überraschungen, wie sich Prozesse in einem bestimmten Gebiet tatsächlich auswirken. Während eines Ereignisses sind ganz unterschiedliche Abläufe vorstellbar, die sich sprunghaft verstärken, überraschend verändern oder anders als erwartet entwickeln.

Liegen für einen Prozess umfangreiche und lückenlose Beobachtungen vor, lassen sich die vorhandenen Unsicherheiten mit statistischen Mitteln, beispielsweise durch Konfidenzintervalle quantifizieren. Diese Situation ist für vergleichsweise häufig auftretende Prozesse am ehesten gegeben. In diesem Fall lässt sich zu einer Eintretenswahrscheinlichkeit mittels statistischer Analysen eine Intensität mit entsprechender Unsicherheit bestimmen (Abb. 14, links).

Für die Sturzbeurteilung soll – wenn möglich – auch bei wenigen Ereignisdaten die mögliche Bandbreite abgeschätzt und dargelegt werden. Extrapolationen mit zunehmender Grösse (Volumen) oder höherer Geschwindigkeit sind notwendig, wenn z. B. im Kataster nur häufige Ereignisse schwacher Intensität registriert wurden und die Feldbeurteilung die Möglichkeit grösserer Ereignisse belegt.

Besondere Vorsicht ist bei der Extrapolation auf ganz seltene Ereignisse angebracht, bei welchen Schwellenprozesse, Prozesswechsel und Prozessverkettungen auftreten, die im vorhandenen Datensatz nicht abgebildet sind (Abb. 14 rechts). Entsprechend sollen die vorhandenen Unsicherheiten abgeschätzt werden. Die entsprechenden Szenarien müssen fundiert und gut dokumentiert werden.

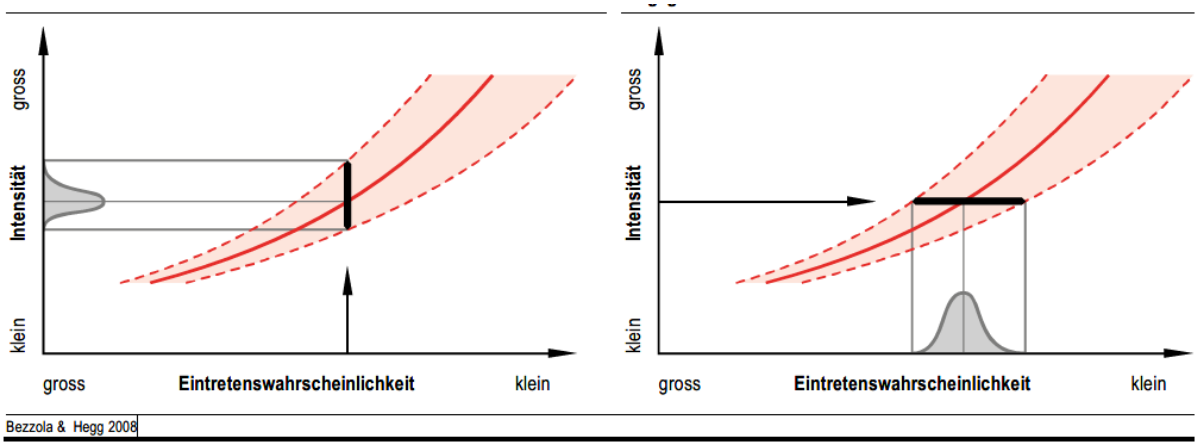


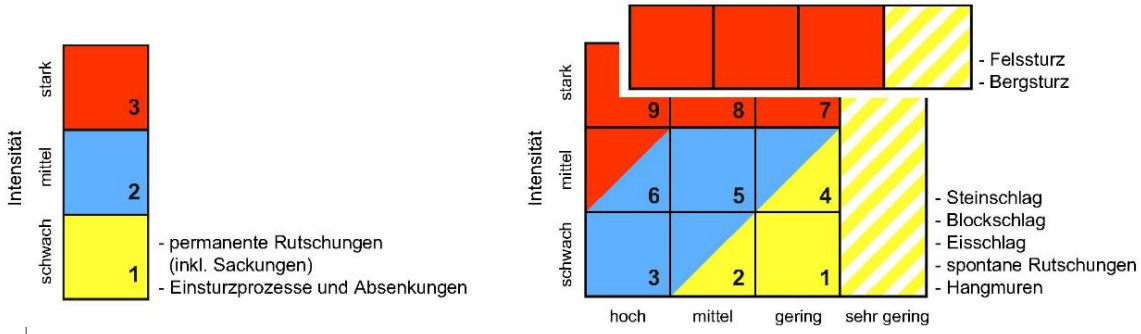
Abbildung 14: Beim Umgang der Unsicherheiten gilt es sowohl (links) die Bandbreite der Intensität bei vorgegebener Eintretenswahrscheinlichkeit sowie (rechts) die Bandbreite der Eintretenswahrscheinlichkeit bei vorgegebener Intensität zu berücksichtigen (übernommen aus BAFU, 2016).

6.9 Ausarbeitung der definitiven Intensitätskarte und Gefahrenkarte

Auf der Grundlage der definitiven Intensitätskarte wird gemäss dem Gefahrenstufendiagramm die Gefahrenkarte erstellt.

- Zusammenfassung der Intensitätskarten (IK) für 30, 100 und 300 Jahre und allenfalls Extremereignisse der verschiedenen Prozessquellen. Teilweise werden auch Gefahrenkarten (GK) pro Prozessquelle erarbeitet. Die GK haben den IK zu entsprechen. Falls letzte Anpassungen erforderlich sind, sind immer die IK und GK anzupassen und nicht nur die GK (ohne Anpassung der IK).
- Überprüfung der Zwischenbereiche zwischen den einzelnen Prozessquellen und Kontrolle der Randbereiche.

- Überführung der IK in GK gemäss Gefahrenstufendiagramm (Abb. 15). Ausscheiden von roten, blauen, gelben, gelb-weiss gestreiften und weissen Gefahrengebieten.
- Bei einer Restgefährdung (sehr geringe Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Fels- oder Bergsturzes) ist die Ausscheidung gelb-weiss gestreifter Gebiete angezeigt (Achtung: nicht in allen Kantonen werden gelb-weiss gestreifte Gebiete ausgeschieden). Die Ausscheidung von gelb-weiss gestreiften Gebieten sind aber restriktiv zu handhaben (z.B. bei grösseren Unsicherheiten verbunden mit einem hohen Schadenpotential oder bei Ausscheidung eines Extremszenarios).



	Gefahrenstufe	Bedeutung
	Rot: erhebliche Gefährdung	• Personen sind sowohl innerhalb als auch ausserhalb von Gebäuden gefährdet. • Mit der raschen Zerstörung von Gebäuden ist zu rechnen. oder: • Die Ereignisse treten zwar in schwächerem Ausmass, dafür aber mit hoher Wahrscheinlichkeit auf. In diesem Fall sind Personen vor allem ausserhalb von Gebäuden gefährdet. Gebäude sind von relevanten Schäden betroffen oder werden unbewohnbar.
	Blau: mittlere Gefährdung	• Personen sind innerhalb von Gebäuden kaum gefährdet, jedoch ausserhalb davon. • Mit Schäden an Gebäuden ist zu rechnen, jedoch sind rasche Gebäudezerstörungen in diesem Gebiet nicht zu erwarten, falls gewisse Auflagen bezüglich Bauweise beachtet werden.
	Gelb: geringe Gefährdung	• Personen sind kaum gefährdet. • Mit geringen Schäden an Gebäuden bzw. mit Behinderungen ist zu rechnen.
	Gelb-weiss gestreift: Restgefährdung	• Gefährdungen mit einer sehr geringen Eintretenswahrscheinlichkeit können durch eine gelb-weiss gestreifte Signatur bezeichnet werden. Das gelb-weiss gestreifte Gebiet ist ein Hinweisbereich, der eine Restgefährdung bzw. ein Restrisiko aufzeigt. • Die Ausscheidung von Hinweisbereichen ist restriktiv zu handhaben. Sie soll prozessspezifisch und schadenpotenzialorientiert erfolgen.
	Weiss	• Nach dem derzeitigen Kenntnisstand keine oder vernachlässigbare Gefährdung.

Abbildung 15: Gefahrenstufendiagramm gemäss BAFU (2016) mit Bedeutung der Gefahrenstufen.

6.10 Dokumentation / Technischer Bericht

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

Die Dokumentation für eine Gefahrenbeurteilung Sturz ist in der Regel in den entsprechenden Pflichtenheften vorgegeben. Sie beinhaltet:

- Technischer Bericht: Aufbau und Inhaltsverzeichnis gemäss Absprache mit Auftraggeber; mit allen notwendigen Berechnungen, Modellierungen, Erläuterungen zu den Methoden (u.a. verwendete Simulationsmodelle). Annahmen und Unsicherheiten sollen deklariert werden
- Dokumentierte Ereignisse, bzw. Auszug Naturereigniskataster

- Karte der Phänomene zur Nachvollziehbarkeit der Geländebefunde (Massstab und Form der Fragestellung entsprechend)
- Schutzbautenkataster mit Wirkungsbeurteilung
- Beschreibung der einzelnen Liefergebiete in sogenannten Factsheets mit Fotodokumentation. Dazu gibt es in verschiedenen Kantonen entsprechende Vorlagen (siehe Anhang 2: Beispiel Kanton Luzern).
- Inputparameter der Sturzmodellierungen (Blockdimensionen und -form, Dichte, Startpunkte, verwendete Bodenparameter pro Fläche resp. pro Profilabschnitt); Lage der Profile für 2D-Simulationen;
- Output der Sturzmodellierungen (graphische Darstellung der Modellierungsergebnisse (Profile für 2D, Karten für 3D): Reichweite, Anzahl der Durchgänge resp. Wahrscheinlichkeit des Erreichens, Energie, Sprunghöhen, statistische Verteilungen, verwendete Modellierungsgrundlagen)
- Karte mit Projektperimeter
- Intensitätskarten in der Regel 1: 5’000
- Gefahrenkarte 1: 5'000

Je nach Fragestellung, Detaillierungsgrad der Untersuchung (Gefahrenhinweiskarte, Gefahrenkarte, Detailuntersuchung) und Kanton sind auch noch andere Produkte abzugeben.

7 Literatur

BAFU, 2016: Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1608: 98 S.

BAFU, 2015: Datenmodell Gefahrenkartierung. www.bafu.admin.ch/geodatenmodelle

BAFU, 2021: Hinweise zum Einsatz von Modellen bei der Sturzgefahrenbeurteilung, Merkblatt. Bundesamt für Umwelt, Bern (in Vorbereitung).

BAFU, 2021: Projektierung von Steinschlagschutzdämmen, Merkblatt. Bundesamt für Umwelt, Bern (in Vorbereitung).

BUWAL, 1998: Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Eine risikoorientierte Betrachtungsweise. Bern: 247 S.

BWW, BUWAL, 1995: Empfehlungen – Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene. Reihe Naturgefahren. Bern: 60 S.

Berger F., 2004: Réalisation d'un test d'étalonnage des modèles de trajectographie en utilisant des données provenant d'expérimentations grandeur nature. Rapport de synthèse.

Corominas J., Mavrouli O., Ruiz-Carulla R., 2017: Rockfall Occurrence and Fragmentation. In 4th World Landslide Forum. K. Sassa et al. (eds), Advancing Culture of Living with Landslides.

Evans S.G., Hungr, O., 1988: Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. In. Bonnard, C., 1988: Landslides. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne. Vol 1: S. 685-690

Fehlmann M., Mani P., Stoffel M., 2016: Der Einfluss des Klimas auf Steinschlag im periglazialen Prozessbereich der Alpen. FAN Agenda (Herbstkurs), S. 25-31.

Fischer L., Purves R.S., Huggel C., Nötzli J., Häberli W., 2012: On the influence of topo-graphic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas. Natural Hazard and Earth System Sciences 12, S. 241-254.

Frehner M., Wasser B., Schwitter R., 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS). Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.

Gerber W., 2016: Auswirkungen des Felssturzes in Wolhusen vom 11. Januar 2016. FAN-Agenda 1, S. 13-18.

Gerber W., 1994: Beurteilung des Prozess Steinschlag. FAN-Kurs 1994 in Poschiavo.

Guzzetti F., Reichenbach P., Wieczorek G.F., 2003: Rockfall hazard and risk assessment in the Yosemite Valley. Natural Hazard and Earth System Sciences 3, S. 491-503.

Heim A., 1932: Bergsturz und Menschenleben. Fretz & Wasmuth Verlag. Zürich.

Heinimann H.R., Breschan J., 2015: Grundzüge des Naturgefahrenmanagements – Extremwertstatistik I und II. Vorlesungsunterlagen der DERDW und DUSYS der ETHZ.

Louis Ingenieurgeologie GmbH, 2017: Integrales Risikomanagement Badflue Werthenstein / Wolhusen. Vorstudie Massenbewegungsgefahren, Bericht Nr. 16-01 DP, Weggis 25.09.2017.

Mani P., 2016: Prozess- und Ereignisketten. FAN Agenda (Herbstkurs), S. 67-76

PLANAT, 2018: Umgang mit Risiken aus Naturgefahren, Strategie 2018. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern, 30 S.

PLANAT, 2015: Sicherheitsniveau für Naturgefahren - Materialien. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern, 68 S.

Romang H., 2008: Wirkung von Schutzmassnahmen (Strategie Naturgefahren Schweiz), Projekt A3. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, Bern, 289 S.

Rovina H., et al., 2011: Empfehlung für den Umgang mit Sturzmodellierungen. Bulletin für angewandte Geologie 16/1, S. 57-79.

Stoffel M., Huggel C., 2012: Effects of climate change on mass movements in mountain environments. Progress in Physical Geography 36, S. 421-439.

Wasser B., Perren B., 2009: PROTECT Bio, Methodik zur Beurteilung der Wirkung biologischer Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung bei Risikoanalysen. Bundesamt für Umwelt, Abteilung Gefahrenprävention, Bern, 88 S.

8 Anhänge

8.1 ANHANG 1: Überblick über Steinschlagsimulationsprogramme

Die nachfolgenden Ausführungen beruhen im Wesentlichen auf dem Artikel von Rovina et al. (2011), sie wurden – so weit als möglich – aktualisiert und haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Programm (Hersteller)	Rockfall V7.1 (Spang)	Rockyfor 3D (Dorren)	FofMod5 (GEOTEST)	RocFall (Rocscience inc.)	Colorado (Col. Dep. of Transp.)	RAMMS::ROCKFALL	Bemerkungen
käuflich erhältlich	ja	ja [1]	ja (nur 2D)	ja	ja [11]	ja	[1] Mitgliedschaft im Verein ecorsisQ erforderlich, Modell gratis [11] läuft nur auf Betriebssystem Windows7 und älter
Berechnungsart							
Berechnung probabilistisch	ja	ja	nein [2]	ja	ja	nein	[2] nur Waldfunktion probabilistisch
Berechnung deterministisch	nein [3]	nein	ja	nein [3]	nein [3]	ja	[3] Standard nein, ja wenn alle Parametervariationen auf 0 gesetzt werden
Berechnungsmöglichkeiten							
2D-Simulationen (Profile)	ja	nein	ja	ja	ja	ja [12]	[12] Analyse von Einzeltrajektorien möglich
3D-Simulationen (flächig auf DGM)	nein	ja	ja [4]	nein	ja	ja	[4] nur durch Hersteller.
Prozessart Springen	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
Prozessart Rollen	ja	nein [5]	ja	ja	ja	ja	[5] wird als sehr kleine Sprünge gerechnet
Prozessart Gleiten	ja	nein	nein	ja	nein	ja	
Eingabeparamter für Geländeabschnitte (Profillamellen, Geländebereiche)							
Anzahl Einzelblöcke für Berechnung	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
Blockform rund: Kugel, Scheibe, Zylinder	ja	ja	ja [6]	ja	ja	ja [13]	[6] Rundungsgrad (rund: Kugel, Ellipsoid) [13] Blockformen können individuell erzeugt werden
Blockform eckig, beliebig über 3 Achsen	nein	ja	ja	nein	ja	ja [13]	[13] Blockformen können individuell erzeugt werden
Dämpfung (Gleit- und Haftreibung, Elastizität)	ja	ja	ja	ja	ja	ja	
Rauigkeit	ja	ja	ja	nein	ja	ja	
Wald als Dämpfungsfunktion (Filterfunktion)	ja [7]	nein	nein	ja [10]	nein	ja	[7] abhängig von Stammzahl und -dichte; [10] abhängig von der Basisfläche
Wald mit Stammdurchmesser und -dichte (Berechnung Interaktion Stein/Baum)	nein	ja	ja	nein	nein	nein	
Datenaufbereitung Eingabeparameter mit GIS für 3D-Simulationen	nein	QGIS / ESRI	ESRI	nein	ASCII		
Parametervariation (Vorgabe, Variation bei Einzelberechnung)							
Ausbruchsort (Punkt, Bereich)	ja [9]	ja [9]	ja [8]	ja [9]	ja [9]	ja	ja = Einfluss auf Ausgabestatistik
Blockgrösse (Variation am Start gegenüber Vorgabe)	ja [9]	ja [9]	nein	nein	nein	nein	
Hangneigung (Variation gegenüber Profilneigung)	ja [9]	ja [9]	nein	nein	ja [9]	nein	[8] Variation deterministisch (fix verteilt über vorgegebenen Bereich)
Dämpfung (Variation gegenüber Vorgabe in Profillamellen)	ja [9]	ja [9]	nein	nein	nein	nein	

Rauigkeit (gegenüber Vorgabe in Profillamellen)	ja [9]	ja [9]	nein	nein	nein	nein	[9] Variation probabilistisch (zufällig verteilt über vorgegebenen Bereich)
Baumdurchmesser (Variation in vorgängig fixierter Bandbreite)	nein	ja [9]	ja [9]	nein	nein	nein	
Baum: Trefferzentrizität	nein	ja [8]	ja [9]	nein	nein	nein	
Resultatdarstellung (Trajektorien, Geschwindigkeit, Sprunghöhen, Energie, Blockdurchgang)							
Statistische Verteilung entlang des gesamten Profils	ja	nein	ja	ja	ja	ja [14]	[14] Darstellung einer einzelnen Trajektorie
Statistische Verteilung an fixierter Stelle	ja	nein	nein	nein	nein	ja	
Flächige Datenausgabe	nein	ja	ja	nein	ja	ja	

8.2 ANHANG 2: Factsheets mit Fotodokumentation (Bsp. Kanton Luzern)

Im Auftrag von

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU