
17 Steinschlag und Felssturz

Alexander Preh, Michael Mölk und Mariella Illeditsch*

Zusammenfassung

Steinschlag und Felssturz sind von Felsböschungen ausgehende Prozesse, welche relativ häufig Siedlungsräume, Verkehrswege und andere Infrastrukturen gefährden. Die Planung, Ausführung und Instandhaltung von Steinschlagschutzmaßnahmen ist ausgehend von der Erhebung der prozessrelevanten Parameter über die Festlegung der maßgeblichen Bemessungsgrößen hin zu den charakteristischen Widerständen diverser Schutzsysteme in Österreich durch die Richtlinie für den technischen Steinschlagschutz (ONR 24810:2017) umfassend standardisiert.

Extremereignisse bei Steinschlag definieren sich in Österreich daher durch das entsprechend der ONR 24810:2017 (2017) festzulegende Bemessungsereignis. Treten Magnituden (Einwirkungen) größer als das Bemessungsereignis auf (der Überlastfall), sind diese als extrem zu betrachten bzw. die Folge eines Extremereignisses.

Bei Felsstürzen kommt es infolge des Abbruchs und der Fragmentierung größerer zusammenhängender Felsmassen zu zeitgleichen Ereignissen (Steinschlag) und folglich sind zeitnahe Einwirkungen auf Personen und Infrastruktur/Schutzmaßnahmen möglich. Darüber hinaus entspricht die Definition von Extremereignissen jener von Steinschlag. Über die Definition der Extremereignisse hinaus werden das von Steinschlag ausgehende Risiko betrachtet, Fallbeispiele und die Entwicklung der Extremereignisse im alpinen Raum diskutiert und Perspektiven für Handlungsoptionen aufgezeigt.

Abstract

Rock fall and rock mass fall are processes emanating from rock slopes, which often put settlement areas, roads and other infrastructure at risk. In Austria, the design, construction and maintenance of rock fall protection measures is standardised by the Guideline for technical protection against rock fall (ONR 24810:2017) comprehensively, originating from the investigation of relevant process parameters across to the determination of significant calculation parameters to the point of the characteristic resistance of various protection systems.

* Alexander Preh, Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, alexander.preh@tuwien.ac.at.

Michael Mölk, Wildbach- und Lawinerverbauung, Geologische Stelle, michael.moelk@die-wildbach.at.

Mariella Illeditsch, Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, mariella.illeditsch@tuwien.ac.at.

Therefore, in Austria, extreme rock fall events are defined by the design event, which is determined according to the ONR 24810:2017 (2017). Magnitudes (impacts) greater the design event (overload case) can be considered extreme or rather the result of an extreme event.

The detachment of a bigger coherent rock mass and its fragmentation leads to contemporaneous events (rock fall), which may be followed by contemporary impacts on people and infrastructure/protection measures.

Beyond the definition of extreme events, the risk emanating from rock fall is considered, case studies and the development of extreme events in the alpine region are discussed and prospects for recommended procedures are identified.

Kernaussagen

- Unter Steinschlag versteht man das Fallen, Springen und Rollen von isolierten Steinen und Blöcken.
- Bei Felsstürzen brechen zusammenhängende Felsmassen ab, die während des Abbruchs in Steine und Blöcke fraktionieren, welche sich anschließend als individuelle Fragmente talwärts bewegen.
- Extremereignisse definieren sich über ihre Magnitude und ihre Ereignisfrequenz. Ereignisse mit Magnituden, welche das in der nationalen Richtlinie ONR 24810:2017 definierte Bemessungsereignis übersteigen (Überlastfälle), sind als Extremereignisse anzusehen.
- Extremsituationen sind Situationen mit einem extrem hohen Schadenspotential. Ausschlaggebend sind hier die Ausgesetztheit sowie die Vulnerabilität von Personen und Infrastruktur.
- Extremereignisse in Extremsituationen können auch bei den Prozessen Steinschlag und Felssturz zu einer Katastrophe (entsprechend T-KMG, 2006) führen.
- Die derzeit vorhandenen (gängigen) Steinschlagmodelle sind in der Lage Extremereignisse abzubilden.
- In den allermeisten Fällen wäre es auch mit aufwändigen Schutzmaßnahmen nicht möglich, eine vollständige Minderung/Reduktion der Risiken infolge von Extremereignissen zu erreichen.

Key Points

- Rock fall is the falling, jumping and rolling of isolated rocks or blocks.
- Rock mass fall is the detachment of a coherent rock mass fragmenting into rocks and blocks and subsequently moving downwards as individual fragments.
- Extreme events are defined by their magnitude and probability. Events with higher magnitudes than the defined design event according to the national guideline ONR24810:2017 (overload case), can be defined as extreme events.
- Extreme situations are situations with extremely high damage potential. Crucial factors are the exposure and vulnerability of people and infrastructure.
- In extreme situations, an extreme rock fall or rock mass fall event may lead to a catastrophe (according to T-KMG, 2006).
- Presently available (current) rock fall programs are able to model extreme events.
- In most cases, even with extensive rock fall protection measures, it's not possible to fully mitigate the risks due to extreme events.

17.1 Einleitung

In vielen gebirgigen Regionen weltweit sind von Felsböschungen ausgehende Sturzprozesse eine häufig auftretende Prozessgruppe, welche Siedlungsräume, Verkehrswege und andere Infrastrukturen gefährdet. Diese Prozessgruppe lässt sich in Einzelabstürze (Steinschlag, Blockschlag) und Massenstürze (Felssturz, Felslawine) untergliedern. Das wesentliche Unterscheidungskriterium zwischen einem Einzelabsturz und einem Massensturz ist, dass bei Massenstürzen mehr oder weniger kompakte Felsmassen abbrechen, die während des Abbruchs (entsprechend des vorherrschenden Versagensmechanismus) in Blöcke und Steine fragmentieren, während sich bei Einzelabstürzen lediglich einzelne Kluffkörper aus dem Gefüge der Felswand lösen.

Massenstürze werden entsprechend ihres Abbruchvolumens und ihres Prozessverhaltens in Felsstürze und Felslawinen untergliedert. Hat die Interaktion der Komponenten untereinander einen maßgeblichen Einfluss auf die Mobilität der Sturzmasse, dann verhält sich diese mechanisch ähnlich einer Lawine (»Sturzstrom«; Heim, 1932). Diese hochmobilen Prozesse werden in der aktuellen internationalen Literatur daher zumeist als Felslawine (rock avalanche) oder bei Sturzmassen $> 1 \text{ Mio m}^3$ in der deutschsprachigen Literatur oft als Bergsturz angesprochen. Diese Massenstürze werden im Beitrag 16 zu *Felsgleitung, Felslawine und Erd-/Schuttstrom* detailliert behandelt.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die von Felsböschungen ausgehenden Prozesse Steinschlag, Blockschlag und Felssturz, wobei unter einem Felssturz in diesem Zusammenhang ein Sturzprozess verstanden wird, bei dem die Interaktion der Komponenten untereinander »keinen maßgeblichen Einfluss« auf die Ausbreitung der Sturzmasse hat.

17.1.1 Definition Steinschlag

Evans und Hungr (1993) beschreiben den Prozess Steinschlag als die Bewegung individueller, voneinander unabhängiger Felsfragmente, die mittels episodischer Einschläge mit dem Untergrund interagieren. Die österreichische Richtlinie zum Technischen Steinschlagschutz (ONR 24810:2017) beschreibt Steinschlag gemäß der Definition nach Kienholz et al. (1998) als das Fallen, Springen und Rollen von isolierten Steinen und Blöcken.

Entsprechend den gängigen Definitionen kann der Prozess Steinschlag als die Bewegung individueller, voneinander unabhängiger Felsfragmente (Steine und Blöcke) beschrieben werden, wobei nach Bozzolo (1987) vier Bewegungszustände der Fragmente zu unterscheiden sind: Fallen, Springen, Gleiten und Rollen. Entsprechend vieler Beobachtungen ist der dominante Bewegungszu-

stand jedoch zumeist das Springen, also die Interaktion des Felsfragments mit dem Untergrund mittels episodischer Einschläge. Die übrigen Bewegungszustände (Fallen, Gleiten und, Rollen) beobachtet man vor allem am Beginn und am Ende einer Trajektorie.

Oftmals wird entsprechend der Größe der Fragmente zwischen Steinschlag und Blockschlag unterschieden. Kienholz et al. (1998) definiert den Sturzprozess von isolierten Felsfragmenten mit einem mittleren Durchmesser ≤ 0.5 m als Steinschlag und > 0.5 m als Blockschlag. Diese Unterscheidung findet in der aktuellen Literatur und in der Praxis jedoch nur mehr geringe Beachtung, da sie sich nicht auf den Prozess, sondern lediglich auf die Größe des Fragments bezieht. Als prozessbedingtes Unterscheidungsmerkmal können die vorherrschenden Bewegungszustände während des Sturzprozesses dienen, wobei der dominante Bewegungszustand (zumeist Rollen oder Springen) in hohem Maße von der Fallhöhe, der Länge und der Morphologie (Hangneigung etc.) der Sturzbahn, der Beschaffenheit der Oberfläche (Oberflächenrauheit und Dämpfung) und den Materialeigenschaften des vorherrschenden Gesteins (z. B. Einfluss durch Fragmentierung) abhängig ist. Es gibt aber die generelle Beobachtung, dass große Blöcke im Vergleich zu kleineren Blöcken mehr Rollen als Springen.

Sturzversuche an bewaldeten und nicht bewaldeten natürlichen Hängen (Smith und Duffy, 1990; Dorren et al., 2006; Usiro et al., 2006; Pamminer 2018; Rauscher, 2018) und Rückrechnungen von Steinschlagereignissen haben gezeigt, dass die maximal auftretenden Prozessgeschwindigkeiten im Allgemeinen bei 30 bis 35 m/s liegen. Vereinzelt wurden jedoch auch schon Geschwindigkeiten von über 45 m/s beobachtet bzw. rückgerechnet (z. B. Liechtensteinklamm, siehe Abbildung 01).

17.1.2 Definition Felssturz

Unter dem Prozess Felssturz versteht man den Abbruch (Disposition) einer größeren mehr oder weniger kompakten Felsmasse, die während des Abbruchs – entsprechend dem vorherrschenden Versagensmechanismus (Poisel und Preh, 2004) – in Steine und Blöcke fragmentiert, die in weiterer Folge als mehr oder weniger individuelle Fragmente talwärts stürzen. Bei diesem Prozessstyp hat die Interaktion der Fragmente untereinander während des dem Abbruch folgenden Sturzprozesses »keinen maßgeblichen Einfluss« auf die Mobilität der Sturzmasse. Die Fragmente der Sturzmasse (Steine und Blöcke) verhalten sich entsprechend dem im vorhergehenden Kapitel definierten und beschriebenen Prozess Steinschlag.

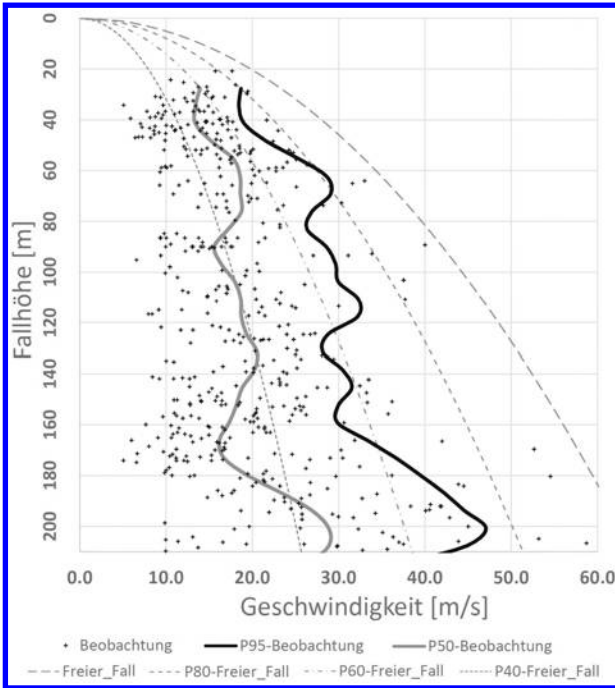


Abbildung 01: Beobachtete Geschwindigkeiten entlang der vertikalen Erstreckung der Versuchsböschung Liechtensteinklamm im Vergleich zur Geschwindigkeit des Freien Falls. Anmerkung: Pxx = 0,xx Perzentil der Geschwindigkeit des freien Falls.

Figure 01: Observed velocities along the vertical section of the test slope Liechtensteinklamm, compared to free fall velocity. Note: Pxx = 0,xx velocity percentile of free fall.

Quellen: Pamninger, 2018; Rauscher, 2018

Gemäß der Definition von BRP et al. (1997) wird bis zu einem Abbruchvolumen von 100 m^3 von Blockschlag gesprochen und bei größeren Volumina von Felssturz. Nach dem heutigen Verständnis können Stein- sowie Blockschlag aus einem Felssturz hervorgehen, wie oben beschrieben.

Abbruch und Sturzprozess sind miteinander gekoppelte Prozesse (Preh, 2016). Ein ideales Modell (Universalmodell) müsste in der Lage sein, diese beiden teilweise sehr unterschiedlichen Prozesse abzubilden. Da wir aber noch über kein zufriedenstellendes Universalmodell verfügen, müssen diese Prozesse rechnerisch derzeit noch getrennt behandelt werden.

17.2 Vom Prozess Steinschlag ausgehende Gefahr und ausgehendes Risiko und deren Beurteilung in Österreich und international (z. B. in der Schweiz)

Gefahr besteht dann, wenn aus einem Prozess Schaden für Personen und/oder Sachgüter entstehen kann (ÖGG, 2014). Die von einem Prozess wie z. B. Steinschlag ausgehende Gefahr wird einerseits durch seine Intensität und andererseits durch seine Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt (siehe Gleichung 17.1). Die Kombination von Intensität (I , intensity) und Eintrittswahrscheinlichkeit (P , probability) zur objektivierten Beurteilung der Gefahr (H , hazard) macht insofern Sinn, da im Allgemeinen lediglich ein möglicher großer Schaden mit einer subjektiv als hoch empfundenen Eintrittswahrscheinlichkeit als Gefahr wahrgenommen wird. Ein unwahrscheinliches Eintreten eines großen Schadens wird hingegen im Allgemeinen kaum als große Gefahr empfunden. Umgekehrt wird es auch nicht als große Gefahr empfunden, eine Geldmünze zu verlieren, obwohl bei diesem Szenario die Eintrittswahrscheinlichkeit eher hoch ist.

$$H = I * P \quad (17.1)$$

Durch die hohen Geschwindigkeiten, die herabfallende Blöcke erreichen können, kann die Intensität – selbst von kleinen Steinen – sehr hoch sein. Für Personen kann daher der kleinste stürzende Stein eine große Gefahr darstellen, umso mehr, weil die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Fallen kleiner Steine im Allgemeinen höher ist als für große. Für Infrastrukturen besteht erst ab einer gewissen Intensität Gefahr.

Das von Scheinschlag ausgehende Risiko (Corominas, 2005, 2012) berücksichtigt den von Steinschlag verursachbaren Schaden für Personen und Infrastrukturen. Das von Steinschlag ausgehende Risiko (R) wird durch das Produkt der von Steinschlag ausgehenden Gefahr (H), dem der Gefahr ausgesetzten Personen und Infrastrukturen (E , exposure), der Vulnerabilität der ausgesetzten Personen und Infrastrukturen (V) und den Kosten der gefährdeten Subjekte/Objekte (C , cost) ermittelt:

$$R = H * E * V * C \quad (17.2)$$

17.2.1 Österreich

Im Rahmen der Partnerschaft der Österreichischen Raumordnungskonferenz (ÖROK) »Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplana-

nung« wurden fachliche Empfehlungen und ein Materialienband erarbeitet (Bäk et al., 2015), in dem eine standardisierte Vorgangsweise zur Abgrenzung von Steinschlaggefährdungsbereichen (Gefahrenzonierung) beschrieben wird. Bei den Empfehlungen werden für die Gefahrenzonierung von Sturzprozessen drei Maßstabebenen unterschieden: regionale Ebene, kommunale Ebene und Objektebene. Folgend wird der derzeitige Stand in Österreich im Kontext mit den Empfehlungen der ÖROK skizziert.

Einige Bundesländer verfügen über regionale Gefahrenhinweiskarten (M=1:25.000–50.000), welche auf durch Steinschlag gefährdete Bereiche hinweisen (z. B. NÖ Atlas, Land Niederösterreich, 2018). Es handelt sich hierbei lediglich um die Ausweisung von Gebieten, die von Steinschlag betroffen sein können. Die betroffenen Gebiete werden in dieser Maßstabebene zumeist mithilfe des Pauschalwinkelansatzes »Geometrisches Gefälle« (Hsü, 1975; Grundner, 1984; Domaas, 1985; Evans und Hungr, 1993) ermittelt. Gefahrenhinweiskarten beinhalten keine Angaben über Intensitäten oder Wahrscheinlichkeiten. In der derzeitigen Gefahrenzonenplanung der Wildbach- und Lawinerverbauung (gemäß Forstgesetz 1975 (§11) bzw. Gefahrenzonenplanverordnung BGBl 436/1976) ist ebenfalls keine differenzierte Abgrenzung von Gefahrenzonen für Steinschlag vorgesehen. Auch hier erfolgt lediglich die Ausweisung von »Braunen Hinweisbereichen«, die möglicherweise von Rutschungen oder Steinschlag betroffen sein können.

Auf der kommunalen Ebene arbeiten derzeit mehrere Bundesländer an der Erstellung von Gefahrenkarten (M=1:10.000–25.000) für einzelne Gemeinden (z. B. Forschungsprojekt NÖ-Talus). Gefahrenkarten geben an, welche raumrelevanten Bereiche und wie stark diese von Steinschlag betroffen sein können. Die Abschätzung der Reichweite und der Intensität erfolgt in dieser Maßstabebene zumeist mithilfe von Prozessmodellen (verfügbare Modelle siehe Volkwein et al., 2011; Preh und Mölk, 2018). Die Prozessintensität wird hier zumeist entsprechend der berechneten kinetischen Energien beurteilt.

Basierend auf den Empfehlungen der ÖROK (Bäk et al., 2015) wird zurzeit von der Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV) eine Methodik entwickelt und installiert (Mölk und Rieder, 2017), mit deren Hilfe Gefährdungsbereiche nachvollziehbar identifiziert und dargestellt werden können. Dabei ist eine Differenzierung der Gefährdungslage entsprechend der mithilfe von Prozessmodellen berechneten kinetischen Energien erforderlich. Bei dem von Mölk und Rieder (2017) präsentierten Vorschlag wird der Bemessungsblock zur Berechnung der energie-kodierten Trajektorien (siehe Abbildung 02) gemäß der Richtlinie für Technischen Steinschlagschutz (ONR 24810:2017) bestimmt. Daher sind bei dieser Vorgangsweise Wahrscheinlichkeiten indirekt über die Bestimmung des Bemessungsblocks enthalten.

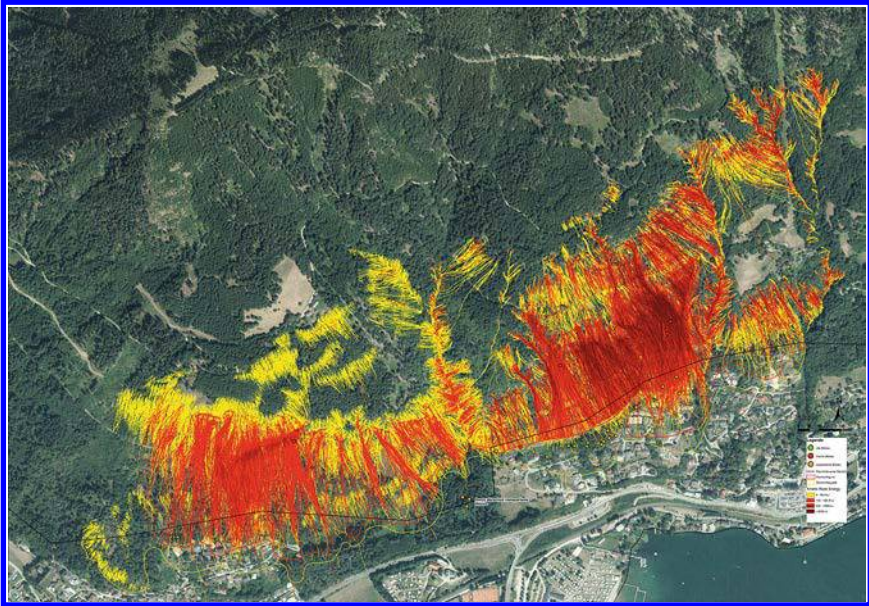


Abbildung 02: Energie-kodierte Trajektorien für eine Gefahrenhinweiskarte/einen Gefahrenzonenplan; gelb: ≤ 100 kJ, rot: > 100 kJ.

Figure 02: Energy-encoded trajectories for hazard indication maps/hazard zone plans; yellow: ≤ 100 kJ, red: > 100 kJ.

Quelle: Preh und Mölk, 2018

Die Beurteilung des von Steinschlag ausgehenden Risikos sowie die Bemessung von entsprechenden technischen Schutzmaßnahmen auf der Objektebene ($M \geq 1:5.000$) erfolgt in Österreich mithilfe der ONR 24810:2017 Technischer Steinschlagschutz. Das zentrale Element dieser Richtlinie ist die Dimensionierung einer sogenannten Bemessungsblockgröße. Dabei werden über die Ereignisfrequenzklassen die Ereigniswahrscheinlichkeit (P), über die Schadensfolgeklassen der potentielle Schaden ($E * V * C$, siehe Gleichung 17.2) und über den Bemessungsblock die Intensität (I) berücksichtigt. Die Abschätzung der Reichweite, der Sprunghöhen und der Intensitäten erfolgt dabei zwingend mit Prozessmodellen (verfügbare Modelle siehe Volkwein et al., 2011; Preh und Mölk, 2018). Zur Bemessung von Schutzbauwerken werden sowohl Einwirkung als auch Widerstand mit Teilsicherheitsbeiwerten in Abhängigkeit der Schadensfolgeklasse beaufschlagt.

Zur Ermittlung der Bemessungsblockgröße sind in Abhängigkeit von der Schadensfolgeklasse CC (siehe Tabelle 01) bzw. der Anzahl der potentiellen Sturzblöcke zwei verschiedene Varianten zulässig.

Tabelle 01: Schadensfolgeklassen CC 1 bis CC 3.**Table 01:** Consequence classes CC 1 to CC 3.

Quelle: ONR 24810:2017, 2017

Schadensfolgekategorie CC	Merkmale	Beispiele
CC 1	Geringe Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr, sowie Scheunen, Gewächshäuser, Forst- und Güterwege mit geringer Verkehrsfrequenz
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen, wie Bürogebäude, regionale und überregionale Verkehrswege mit $DTV \leq 50.000$ KFZ
CC 3	Schwerwiegende Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen, wie Konzerthallen, regionale und Überregionale Verkehrswege mit $DTV > 50.000$ KFZ

Die Schadensfolgen werden in drei Klassen unterschieden, mithilfe derer die verschiedenen möglichen Folgen für Personenleben, Wirtschaft oder Umwelt als gering, mittel oder schwerwiegend eingeteilt werden.

Für die Schadensfolgeklassen CC 2 und CC 3 oder für den Fall, dass mehr als 100 potentielle Sturzblöcke vorliegen, ist eine statistische Erfassung der Bemessungsblockgröße im Ablöse- und/oder Ablagerungsbereich durchzuführen. Bei dieser (ersten) Variante basiert die Wahl der Bemessungsblockgröße auf der im Zuge der Grundlagen- und Geländeerhebung erstellten Blockgrößenverteilung sowie auf einer geschätzten Ereignisfrequenz (siehe Tabelle 02, Abbildung 03).

Die Ereignisfrequenz wird in vier Klassen unterschieden, mithilfe derer die Häufigkeit von Steinschlag zwischen mehr als zehn Ereignissen pro Jahr und weniger als einem Ereignis alle 30 Jahre eingeteilt wird. Entsprechend dieser Klassen wird die Bemessungsblockgröße durch ein Volumens-Perzentil der Blockgrößenverteilung zwischen 98 % und 95 % festgelegt.

Die (zweite) vereinfachte Variante einer gutachterlichen Festlegung ist dann zulässig, wenn höchstens 100 Klufkörper in den potentiellen Ablösebereichen dokumentierbar sind, wenn lediglich Schadensfolgekategorie CC 1 potentiell betroffen ist oder bei Ereignisfrequenzklasse EF 1 und EF 2.

Tabelle 02: Ereignishäufigkeiten und zugeordnetes Volumens-Perzentil der Blockgrößenverteilung.

Table 02: Event frequency classes and assigned volume percentile of the block size distribution.

Quelle: ONR 24810:2017, 2017

Ereignisfrequenzklasse	Ereignishäufigkeit n (1/a)	Fraktile für die Bemessungsblockgröße
EF 4 (sehr hoch)	$n \geq 10$ (≥ 10 Ereignisse/Jahr)	V_{98}
EF 3 (hoch)	$1 \leq n < 10$ (1 bis 10 Ereignisse/Jahr)	V_{97}
EF 2 (gering)	$0,03 \leq n < 1$ (1 Ereignis/1 bis 30 Jahre)	V_{96}
EF 1 (selten)	$n < 0,03$ (< 1 Ereignis/30 Jahre)	V_{95}

Zur Ermittlung der Bemessungswerte für die Einwirkungen auf ein technisches Schutzbauwerk werden das 99 %-Perzentil der Einwirkungs-Energie-Verteilung sowie das 95 %-Perzentil der Sprunghöhenverteilung des Bemessungsblocks aus der Prozess-Modellierung mit Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt, die durch die Schadensfolgeklasse CC bestimmt werden.

Zur Bemessung des Steinschlagschutznetzes, also auf der Widerstandsseite, werden der Nennwert der Energieklasse gemäß ETAG sowie die zugelassene Netzhöhe durch Teilsicherheitsbeiwerte, die ebenfalls durch die Schadensfolgeklasse bestimmt werden, abgemindert.

Bei Steinsschlagschutzdämmen werden beim geotechnischen Nachweis der Tragfähigkeit auf der Widerstandsseite die Materialfestigkeiten mithilfe von Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert, bei der Einwirkung der Sprunghöhe kommt bei Dämmen ein Sicherheitszuschlag in Form eines Freibords zur Anwendung, welcher sicherstellt, dass das Bauwerk vom Sturzblock nicht überrollt wird. Der Freibord wird gem. ONR 24810:2017 in Abhängigkeit von der Bauweise (Erddamm, Steinschlichtung, bewehrte Erde) und von der Böschungseigung festgelegt.

Starre Wände (z. B. Holzbohlenwände) haben i. d. R. keine definierte Energieaufnahmekapazität (keine Europäische Technische Bewertung – CE-Kennzeichnung – wie z. B. Schutznetze) bzw. eine vergleichsweise kurze Lebensdauer und werden daher üblicherweise nicht empfohlen. Stahlbetonwände können für relativ geringe Energie-Einwirkungen (< 300 kJ) eingesetzt werden, gem. Egli (2005) können bewehrte Betonwände mit einer Stärke von 30 cm bis zu 100 cm aufnehmen, mit 50 cm bis zu 300 kJ. Eine standardisierte Vorgangsweise für die

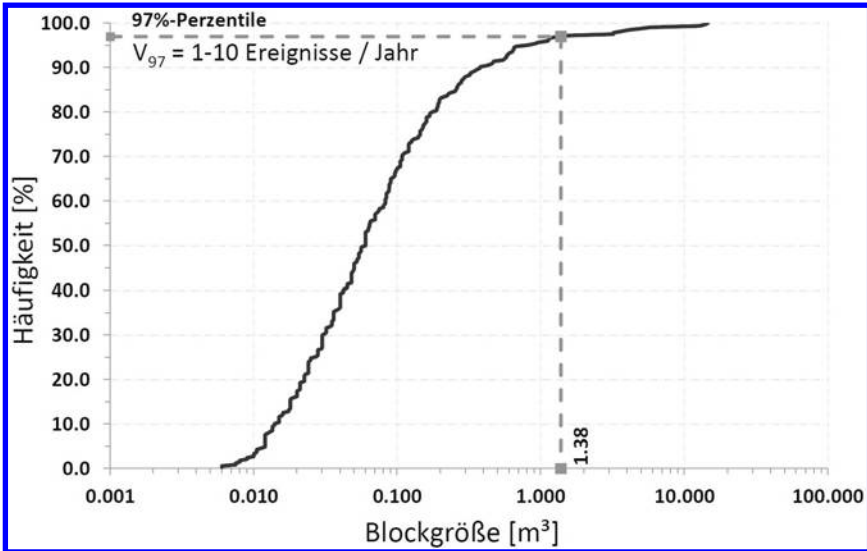


Abbildung 03: Bestimmung des Bemessungsblock-Volumens aus statistischen Aufnahmen einer Schutthalde mittels Linienzählverfahren.

Figure 03: Determination of design block volume from statistic talus investigations using the so-called »line counting approach«.

Quelle: Preh und Mölk, 2018

Bewertung von dynamischen Punktlasten auf starre Konstruktionen existiert derzeit nicht.

17.2.2 Schweiz

Die Schweiz verfolgt die Strategie, dass Risiken nur dann vermieden werden können, wenn sie als solche erkannt werden. Gefahrenhinweis- und Gefahrenkarten dienen dabei als wichtige Grundlage. Die Schweiz verfügt über eine flächendeckende Gefahrenkarte, die eine detaillierte Übersicht über die regionale und lokale Gefährdungssituation in fünf Gefahrenstufen gibt: rot – erhebliche Gefährdung, blau – mittlere Gefährdung, gelb – geringe Gefährdung, gelb-weiß gestreift: Restgefährdung, weiß – keine oder vernachlässigbare Gefährdung (ARE, BWG und BUWAL, 2005).

Die Gefahrenkarte bildet die Grundlage für die Nutzungsplanung (z. B. Ausscheidung von Gefahrenzonen), zur Formulierung von Bauauflagen sowie für die Planung von Schutzmaßnahmen. Sie enthält, zusammen mit den dazugehörigen technischen Berichten, detaillierte Angaben über Ursachen, Ablauf,

räumliche Ausdehnung, Intensität und Eintrittswahrscheinlichkeit von Gefahrenprozessen.

Die Gefahrenstufen zeigen den Grad der Gefährdung von Personen, Infrastrukturen und Sachwerten auf. Sie ergeben sich aus der Intensität und der Eintrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Gefahrenprozesse, gemäß dem sog. Intensitäts-Wahrscheinlichkeits-Diagramm (siehe Abbildung 04). Diese Parameter müssen somit für sämtliche maßgebliche Gefahrenprozesse festgelegt werden.

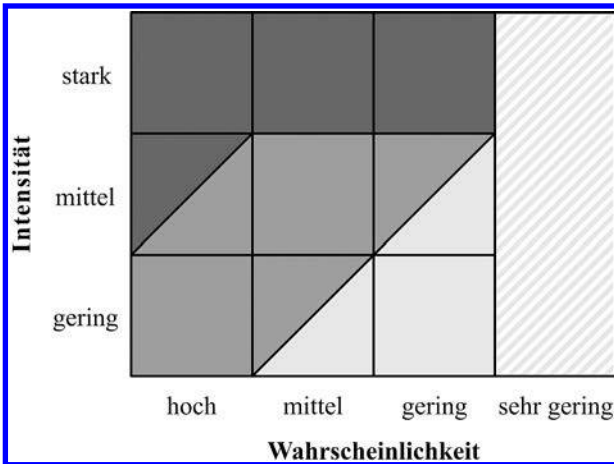


Abbildung 04: Gefahrenstufen: Ergebnis von Intensität und Wahrscheinlichkeit.

Figure 04: Hazard levels: result of intensity and probability.

Quelle: ARE, BWG und BUWAL, 2005, S. 16

Bei identifizierten Schutzdefiziten werden Schutzmaßnahmen vorgenommen, wobei danach die Gefahrenkarte der neuen Gefährdungssituation angepasst wird (»Gefahrenkarte nach Maßnahmen«).

In der Schweiz wird der Bevölkerung sehr offen kommuniziert, dass trotz Schutzmaßnahmen keine absolute Sicherheit gewährleistet werden kann. Um das Ausmaß des verbleibenden Restrisikos abschätzen zu können, werden die Auswirkungen von Extremereignissen überlegt. Mithilfe von Notfallplanung wird versucht, das verbleibende Risiko auf ein akzeptables Maß zu reduzieren.

17.3 Was ist ein Extremereignis?

17.3.1 Allgemein

Ein Extremereignis ist ein Ereignis, das auf den ersten Blick unmöglich erscheint. Es scheint deswegen unmöglich, weil es einerseits ausreichend selten (> 100 Jahre) auftritt, sodass man es »noch nie gesehen« hat und es daher unerwartet war, und weil andererseits die Magnitude des Ereignisses so groß ist, dass enormer Schaden entstehen kann. Extremereignisse können katastrophale Auswirkungen auf Personen, Infrastruktur, Umwelt und/oder Sachwerte haben.

Das Tiroler Katastrophenmanagementgesetz definiert Katastrophen folgendermaßen: »Katastrophen sind durch elementare oder technische Vorgänge oder von Personen ausgelöste Ereignisse, die in großem Umfang das Leben oder die Gesundheit von Personen, die Umwelt, das Eigentum oder die lebensnotwendige Versorgung der Bevölkerung gefährden oder schädigen.« (T-KMG, 2006)

Das Katastrophenschutzgesetz Berlin definiert Katastrophen als »Großschadenereignisse, die [...] von den für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden mit eigenen Kräften und Mitteln nicht angemessen bewältigt werden können.« (KatSG, 1999)

Interpol definiert eine Katastrophe als »unerwartetes Ereignis, bei dem zahlreiche Personen getötet oder verletzt werden« (Interpol, 2009).

Häufig sind durch Extremereignisse die Infrastruktur (Straßen, Brücken, Energie-/Wasserversorgung) und/oder die örtlichen Hilfskräfte und Hilfsressourcen (Polizei, Feuerwehr, Krankenhäuser) selbst beeinträchtigt oder geschädigt.

17.3.2 In Bezug auf Steinschlag

Extremereignisse bei Steinschlag können in Bezug auf die Magnitude und die Ereigniswahrscheinlichkeit definiert werden, Extremsituationen in Bezug auf die Ausgesetzttheit (exposure) und die Vulnerabilität. Treten Extremereignisse in Extremsituationen auf, kann man von einer Katastrophe sprechen (siehe Definition Interpol).

Extremereignisse – in Bezug auf die Magnitude – sind jene Ereignisse, die größer sind, als das Bemessungsereignis (Überlastfall). In Österreich erfolgt die Festlegung des Bemessungsereignisses gemäß der Richtlinie für den Technischen Steinschlagschutz (ONR 24810:2017, 2017) anhand der Einwirkung eines Bemessungsblocks. Die Festlegung des Bemessungsblocks erfolgt, wie in Kapitel 17.2.1 beschrieben, mit einer statistischen Repräsentanz in Abhängigkeit

der Ereignisfrequenz. Alle erfassten Blöcke größer dem festgelegten Bemessungsblock werden als extreme Einwirkungen (Extremereignisse) in Kauf genommen. Diese extremen Einwirkungen (Magnituden) werden gemäß ONR bewusst nicht als Grundlage einer Maßnahmendimensionierung herangezogen, da eine solche Vorgangsweise häufig extrem kostspielig bzw. technisch nicht möglich ist. Eine vollkommene Sicherheit von Personen und Infrastruktur kann nicht gewährleistet werden. Daher muss ein akzeptiertes Restrisiko (akzeptierte Todesfallwahrscheinlichkeit; ÖGG, 2014) festgelegt werden.

Die Vorgangsweise in der Schweiz ist bei der Festlegung von Schutzmaßnahmen auf der Objektebene mit jener in Österreich identisch.

Extremsituationen sind Situationen mit extrem hohem Schadenspotential. Darunter sind ungewöhnlich hohe Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und Vulnerabilitäten zu verstehen, also jene von Steinschlag betroffenen Orte, an denen die Ausgesetztheit (exposure) und Vulnerabilität von Personen und Infrastruktur sehr hoch sind. Dort können selbst kleinste Magnituden große Konsequenzen haben (z. B. Besucherstrom in der Liechtensteinklamm, Salzburg).

17.3.3 In Bezug auf Felssturz

Infolge des Abbruchs und der Fragmentierung größerer Felsmassen kommt es zu zeitgleichen Ereignissen (Steinschlag und Blockschlag) und in weiterer Folge zu zeitnahen Einwirkungen auf Personen und Infrastruktur/Schutzmaßnahmen. Diese zeitnahen Einwirkungen stellen per se ein Extremereignis durch Steinschlag/Blockschlag dar (siehe Fallbeispiel Hinterhornbach 2011 in Kapitel 17.5.2).

Für die aus einem Felssturz resultierenden Einzelereignisse (Steinschlag/Blockschlag) gelten bezüglich der Definition von Extremereignissen und Extremsituationen die beim Steinschlag getroffenen Aussagen.

17.4 Entwicklung von Extremereignissen im alpinen Raum

17.4.1 Aufzeichnungen

Seit Ende des 19. Jahrhunderts gibt es Aufzeichnungen von Steinschlag- und Felssturz-Ereignissen in Österreich (Sass und Oberlechner, 2012). Es ist anzunehmen, dass dokumentierte Ereignisse im 19. und 20. Jahrhundert eher größere Auswirkungen auf Personen und/oder Infrastruktur hatten, weil man sich andernfalls nicht die Mühe der damals vergleichsweise aufwendigen Dokumentation gemacht hätte. Seit dem 21. Jahrhundert gibt es aufgrund der ver-

mehrten Nutzung von Computern und dem Internet sowie der zunehmenden Besiedelung von gebirgigen Regionen jährlich mehr dokumentierte Steinschlag- und Felssturz-Ereignisse. Die Auswirkungen der dokumentierten Steinschlag- und Felssturz-Ereignisse auf Personen und Infrastruktur wurden im Zuge dieser Arbeit nicht analysiert; daher können an dieser Stelle keine direkten Aussagen über die Entwicklung von Extremereignissen gemacht werden. Jedenfalls sind die vorhandenen Aufzeichnungen lückenhaft und nicht repräsentativ. Jede Schlussfolgerung aus diesen Daten muss mit Vorsicht behandelt werden.

In den letzten Jahren werden in wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Medien vermehrt Bedenken einer höheren Gefahr durch (extreme) Naturereignisse in Folge des Klimawandels geäußert. Sass und Oberlechner (2012) haben die in Österreich vorhandenen Aufzeichnungen verglichen und untersucht, um einen allumfassenden Trend durch Klimawandel festzustellen. Dabei wurden keine mikroklimatischen Situationen (wie Frost-Tau-Wechsel oder Porenwasserdruck) berücksichtigt.

Die Analyse von 252 Ereignissen in Österreich zwischen 1900 und 2010 mit einem Abbruchvolumen zwischen 10^2 und 10^6 m³ hat gezeigt, dass nur 9 % der Ereignisse in Höhenlagen über 2.100 m (wo Permafrost möglich wäre) auftreten. Mit wärmeren Sommern kann es vermehrt zu Ereignissen in zurückweichenden Permafrost-Regionen kommen. Es gibt aber derzeit keinen Hinweis darauf, dass die Ereignisse unter 2.100 m (außerhalb der Permafrost-Zone) wegen des Klimawandels zunehmen. Eine Untersuchung in der Schweiz ergab das Gleiche (Gruner, 2008). Im jährlichen Vergleich mit Niederschlag und Temperatur kann keine Korrelation zwischen Erwärmung und Ereignissen gefunden werden. Bestenfalls ist eine Tendenz zu mehr Ereignissen in kalten Jahren, besonders nach kalten Wintern (ev. wegen Frostsprengung), festzustellen. Die meisten Ereignisse finden im Frühling statt, vermutlich wegen vermehrter Wasserzufuhr durch Schmelzwasser und Regen (Porenwasserdruck) sowie durch Frost-Tau-Wechsel. Die Auswertungen von Niederschlagsdaten bis 2006 zeigen keine Zunahme an extremen Niederschlägen in Österreich (Rudel 2008). Aufgrund von wärmeren Wintern könnte es eine saisonale Verschiebung der Ereignis-Häufigkeit von Frühling auf Sommer geben, aber auf eine allgemeine Ereignis-Zunahme gibt es keine Hinweise (Sass und Oberlechner, 2012).

17.4.2 Schutzmaßnahmen

Seit Beginn der Umsetzung von Schutzbauwerken gegen Steinschlag in der Mitte des 20. Jahrhunderts kam es immer wieder zum Versagen solcher Systeme. Das Versagen hatte durchaus unterschiedliche Ursachen. Diese können einerseits in einer unzureichenden Bemessung der aufzunehmenden Einwirkungen und/

oder andererseits in einer vom Bauwerkstyp oder hinsichtlich ihres Widerstandes ungeeigneten Schutzmaßnahme liegen. Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, dass das Versagen von Schutzmaßnahmen sehr häufig aus einer Überlastsituation resultiert (siehe Kapitel 17.5). Das heißt, dass eine Maßnahme für eine bestimmte Ereignismagnitudo und in Abhängigkeit von deren Häufigkeit in Hinblick auf Einwirkung und Widerstand ausgelegt ist, die jedoch nicht das größtmögliche Lastbild darstellt.

Es gibt jährlich mehr Fallbeispiele von durch Extremereignissen zerstörten Schutzbauwerken. Wie weit dies jedoch auf eine zunehmende Anzahl von Extremereignissen und/oder auf eine zunehmende Anzahl von Schutzbauwerken zurückzuführen ist, ist anhand der heutigen Datenlage nicht verifizierbar.

17.5 Fallbeispiele

Im Folgenden werden einige Fallbeispiele in Österreich aufgezeigt, die gemäß den in Kapitel 17.3 festgelegten Definitionen als Extremereignisse bezeichnet werden können. Die meisten in Österreich beobachteten und dokumentierten Extremereignisse stehen im Zusammenhang mit dem Versagen von Schutzsystemen (sogenannten Überlastfällen, siehe Kapitel 17.3.2 oder Beitrag 13 zu *Überlastfälle*).

17.5.1 Einzelereignisse/Steinschlag

17.5.1.1 Blöslahna/Huben 2013 (5 m³ Block)

Bei diesem Steinschlagereignis kam es zur Ablösung eines mehrere 10er m³ großen Felsbereiches im Oberhang. Die abgelösten Felspartien stürzten relativ konzentriert über eine steile Rinne mit geringer Bodenbedeckung und daher relativ ungünstigen Dämpfungseigenschaften in Richtung Unterhang. Innerhalb der Rinne befanden sich mehrere Reihen von Lawinenverbauungen (Stahlschneeburden), die von den Sturzblöcken durchschlagen und weitgehend zerstört wurden (siehe Abbildung 05a). Ein beträchtlicher Teil der Sturzmasse kam im Bereich der Lawinenverbauungen jedoch auch zur Ablagerung. Der im Bereich des talseitigen Rinnenausgangs situierte Waldbestand wurde teilweise zerstört bzw. schwer beschädigt. Bergseits einer hier befindlichen Landesstraße bzw. einer darüber gelegenen Hofzufahrt befand sich ein Steinschlagschutznetz mit einer Energieaufnahme-Kapazität von 5.000 kJ und einer Bauwerkshöhe von 6 m. Der am weitesten in den Unterhang vordringende Sturzblock wies eine Kubatur von ca. 5 m³ auf. Dieser Block beaufschlagte das Randfeld des Schutz-

netzes, das aufgrund der Randposition in der Netzreihe eine reduzierte Energieaufnahmekapazität aufweist und den Sturzblock dennoch schadlos aufnehmen konnte (siehe Abbildung 05b). Die Energieaufnahmekapazität der Hauptfelder des Netzes von 5.000 kJ würden einer Translationsgeschwindigkeit eines 5 m^3 Blockes mit einer Masse von ca. 14 Tonnen von ca. 27 m/s entsprechen. Dies ist ein Wert, der für die vorliegenden Hangneigungen tendenziell gering ist.

Damit handelte es sich bei dem gegenständlichen Ereignis tendenziell um einen Überlastfall, der Bemessungsblock für das Schutznetz war $< 5 \text{ m}^3$, die Schutzmaßnahme hat dennoch den Sturzblock aufgehalten und keine signifikanten strukturellen Schäden erlitten.

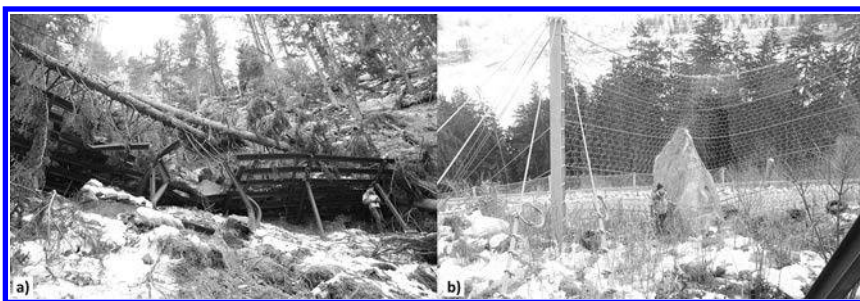


Abbildung 05: Blöslahna/Huben: durch Blockschlag zerstörte Stahlschneebrücke in der Sturzbahn (a); im Steinschlagschutznetz aufgefangener Großblock mit ca. 5 m^3 bzw. 14 Tonnen (b).

Figure 05: Blöslahna/Huben: steel snow bridge along the rock fall path, demolished by block impact (a); 5 m^3 large resp. 14 ton heavy block, held by rock fall protection net (b).

Fotos: WLV Geologie

17.5.1.2 See im Paznaun 1996 (30 m^3 Block)

Ein Blockschlag-Ereignis mit einem ca. 30 m^3 großen Felsblock schlägt in die bergseitige Wand eines Wohnhauses ein und beschädigt es so schwer, dass es nicht mehr bewohnbar ist (siehe Abbildung 06). Aufgrund möglicher Folgeereignisse und den stark eingeschränkten Platzverhältnissen wird das schwer beschädigte Gebäude geräumt und abgetragen. An seiner Stelle wird ein Steinschlagschutzdamm errichtet, der seither die darunterliegenden Gebäude vor Steinschlag schützt.



Abbildung 06: See im Paznaun: Großblock mit ca. 30 m^3 beschädigt ein Wohnhaus so stark, dass es nicht mehr bewohnbar ist.

Figure 06: See im Paznaun: 30 m^3 large block demolishes a house, leaving it uninhabitable.
Foto: WLV Geologie

17.5.2 Felsstürze

17.5.2.1 Hinterhornbach 2011 (Abbruchvolumen einige 10 m^3)

Hier kam es 2011 zu einem kleinen Felssturz mit einigen 10 m^3 Gesamtsturzmasse. Dabei wurde das auf einen Einzelblock mit einer Kubatur von $0,5 \text{ m}^3$ ausgelegte Steinschlagschutznetz im Unterhang von mehreren Sturzblöcken, die vermutlich zeitnah das Netz erreichten, überwunden. Das Netz wurde im Bereich der Belastung weitgehend zerstört (Seilrisse, geknickte Stützen, siehe Abbildung 07a).

17.5.2.2 Holderbach 2006 (Abbruchvolumen einige 100 m³)

Im Holderbach wurde in einer Steinschlagrinne als Steinschlagschutzmaßnahme einer dort befindlichen Wildbachbaustelle ein Steinschlagschutznetz in einer Felsrinne errichtet. 2006 kam es zu einem Felssturz mit einigen 100 m³. Dabei wurde das Netz vollständig überlastet, die Stützen geknickt und die Seilanker ausgezogen (siehe Abbildung 07b). Dabei handelte es sich um einen klassischen Überlastfall, auf den das Netz nicht ausgelegt war. Dennoch wurde der überwiegende Teil der Sturzblöcke hinter dem Netz abgelagert.

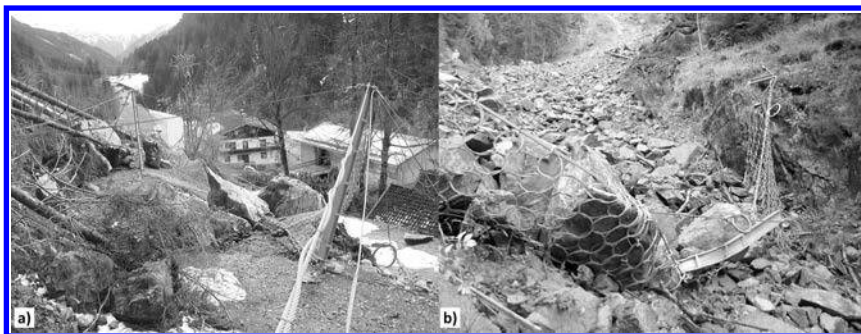


Abbildung 07: Kleiner Felssturz in Hinterhornbach mit einigen 10er m³ Sturzmasse, Überlastfall für Schutzmaßnahmen (dimensioniert auf 500 kJ) (a); Felssturz im Holderbach mit einigen 100er m³ Sturzmasse, Überlastfall für Schutzmaßnahmen (b).

Figure 07: Small rockfall of some 10 m³ falling mass in Hinterhornbach, overload case for protective measures (dimensioned at 500 kJ) (a); Rockfall of some 100 m³ falling mass in Holderbach, overload case for protective measures. (b).

Fotos: WLV Geologie

17.5.2.3 Vals 2017 (Abbruchvolumen ca. 117.000 m³)

Der Felssturz/die Felslawine in Vals (siehe Abbildung 8) ereignete sich am 24. Dezember 2017 und wurde als Massensturz nicht vorhergesehen, obwohl es mehrfach detaillierte geologische Aufnahmen im gegenständlichen Hangabschnitt gegeben hat. In der Hauptsturzbahn befanden sich neben der Landesstraße lediglich landwirtschaftliche Flächen. Gebäude waren vom Ereignis nicht bzw. nicht direkt betroffen, wenn auch nur wenige Meter bis 10er Meter von den Ausläufern der Sturzmasse entfernt.

Geologisch befindet sich der Abbruch des Felssturzes Vals in der Schieferhülle des Tauernfensters und die anstehenden Gesteine sind Kalkschiefer mit Bereichen mit Graphitphylliten.

Aus den Differenzen der mithilfe von mehreren Lidar-Kampagnen für die Situation vor und nach dem Felssturz ermittelten digitalen Höhenmodelle

konnte das Abbruchvolumen von ca. 117.000 m³ und das Ablagerungsvolumen von rund 130.600 m³ bestimmt werden. Die Volumszunahme infolge Erosion und Auflockerung der stark fragmentierten Sturzmasse beträgt somit ca. 11,5 %.

Der hohe Fragmentierungsgrad der Ablagerungen (vor allem im Zentrum, siehe Abbildung 9a) des Massensturzes weist eindeutig darauf hin, dass eine starke Interaktion der Komponenten der Sturzmasse beim Massensturz stattgefunden haben muss und dass man beim Massensturz Vals eher von einer Felslawine als von einem Felssturz sprechen muss.



Abbildung 08: Felssturz bzw. Felslawine Vals: Abbruchvolumen ca. 117.000 m³, Überlastfall für die Schutzmaßnahmen im Randbereich (dunkler Kreis).

Figure 08: Rock fall/rock avalanche of 117.000 m³ falling mass in Vals, overload case for protective measures at the border area (dark circle).

Foto: WLV Geologie

Wie bei vielen Felsstürzen/Felslawinen dieser Größenordnung ereigneten sich auch beim Massensturz Vals mehrere (sekundäre) Stein- und Blockschlagereignisse an den seitlichen Rändern der Sturzbahn und des Ablagerungsbereichs. Ein Großblock zerstörte dabei mehrere Felder eines Steinschlagschutznetzes (siehe Abbildung 9b). Der Großblock stellte mit seinem Volumen von ca. 5 m³ für das für Einzelblöcke bis zu 1 m³ dimensionierte Netz einen Überlastfall, d. h. ein Extremereignis dar.



Abbildung 09: Felssturz bzw. Felslawine Vals: Überlastfall für die Schutzmaßnahmen im Randbereich (dunkler Kreis) (a). Blockschlagereignis am seitlichen Rand des Ablagerungsbereichs zerstört mehrere Felder eines Steinschlagschutznetzes. Die Blockgröße von ca. 5 m^3 stellt im Sinne des Bemessungsblockes (1 m^3) ein Extremereignis dar (b).

Figure 09: Rock fall/rock avalanche Vals: overload case for protective measures at the border area (dark circle) (a). Block impact at the border area demolishes several rockfall protection net segments. The 5 m^3 block size represents an extreme event, with respect to the 1 m^3 design block (b).

Fotos: WLV Geologie

17.6 Einschätzung des Sachstandes und der Unsicherheiten

17.6.1 Stand der Technik

Der Themenbereich Steinschlag ist ausgehend von der Erhebung der prozessrelevanten Parameter über die Festlegung der maßgeblichen Bemessungsgrößen bis zur Kenntnis der charakteristischen Widerstände der Schutzsysteme in Österreich bzw. der EU umfassend genormt und standardisiert (vgl. ONR 24810:2017 Technischer Steinschlagschutz; ETAG027 European Technical Assessment of Rock-Fall Protection Kits).

Für Felsstürze und Felslawinen fehlt derzeit in Österreich eine systematische Erfassung von potentiellen Gefahrenbereichen und den daraus resultierenden Wirkungsräumen bzw. potentiellen Konflikten mit Schutzgütern.

Nachfolgend wird der Stand der Technik für einzelne Aspekte der Prozessbewertung dargestellt:

- Standards für die Kartierung und Erhebung der prozessrelevanten Daten sind in der ONR 24810:2017 beschrieben. Darin ist z. B. festgelegt, dass folgende Inhalte zu erheben und zu bewerten sind:
 - a) die potentiellen Gefahrenbereiche sind flächig zu kartieren,
 - b) die Ablösebereiche sind in Hinblick auf ihre Verbandsfestigkeit und Kluftkörpergrößen zu bewerten,

- c) die Transitbereiche sind in Hinblick auf Rauheit und Dämpfung zu bewerten etc.,
- die Modellierung der Wirkungsbereiche (Reichweite und laterale Ausbreitung) wird für Maßnahmendimensionierungen überwiegend mittels physikalisch basierten 2D bzw. 3D Modellen durchgeführt,
 - die Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten erfolgt auf Basis der Beurteilung der vorliegenden Sturzblöcke (Alter und Häufigkeit des Auftretens),
 - die Abschätzung des Risikos wird in Sonderfällen durchgeführt, wenn die Notwendigkeit einer Schutzmaßnahme strittig ist oder die ausreichende Schutzwirkung der Maßnahme bei hohen Restgefährdungen nachvollziehbar dargestellt werden soll,
 - die Bemessung und Erhaltung von Schutzsystemen (Primärsicherungen, Netze, Dämme, Galerien, Überwachung und Instandhaltung) ist in der ONR 24810:2017 ausführlich dargelegt; diese stellt den Stand der Technik dar. Im Bereich von Monitoring-Systemen sind derzeit keine normativen Regelungen in Österreich vorhanden,
 - die Ausführung von Schutzsystemen (starre Wände, Netze, Dämme, Galerien, Monitoring) mit Ausnahme von starren Wänden (diese werde aufgrund ihrer vergleichweisen kurzen Lebensdauer nicht mehr empfohlen) und des Monitorings ist ebenfalls in der ONR 24810:2017 geregelt,
 - die Dauerhaftigkeit von Schutzsystemen ist einerseits durch eindeutig geregelte Überwachungs- und Inspektionsstandards für verschiedene Schutzsysteme bzw. Schadensfolgekassen (Qualität der Schutzgüter) gewährleistet. Andererseits garantieren die Hersteller von Steinschlagschutznetzen bei normalen Umweltbedingungen eine Lebensdauer von 25 Jahren. Nach Ablauf dieser Frist sind jedenfalls Prüfungen zum Nachweis der aufrechten Schutzwirkung der Bauwerke gem. ONR 24810:2017 (2017) vorgesehen. Andere Bauwerke, wie z. B. Schutzdämme, weisen eine i. w. unbeschränkte Lebensdauer auf, die nur durch Beschädigungen im Lastfall oder durch ungeplante Lastfälle beeinträchtigt werden kann. Eine solche Beeinträchtigung wird jedoch wiederum im Rahmen der gem. ONR 24810:2017 vorgesehenen Inspektionen sichtbar und kann korrigiert werden,
 - Vorgangsweise bei veralteten Schutzsystemen: Veraltete Schutzsysteme sollten in Abhängigkeit von der Gefährdung (Qualität der Schutzgüter, unterstellte Ereignisfrequenz) einerseits in Hinblick auf den Bemessungsvorgang – der mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls nicht zeitgemäß war – und andererseits in Hinblick auf den Stand der Technik bei den Maßnahmen selbst neu bemessen werden,
 - raumplanerische Maßnahmen und Frühwarnsysteme: diese stellen häufig nachhaltige und kostengünstige Maßnahmen zur Gefahrenprävention dar.

Raumplanerische Aspekte beim Umgang mit gravitativen Naturgefahren sind im Materialienband der ÖREK (Bäk et al., 2015) dargestellt. Standards zum Komplex der Frühwarnsysteme sind derzeit nicht verfügbar. Es sollte jedoch darauf Bedacht genommen werden, dass zumindest zwei voneinander unabhängige Messgrößen erfasst werden, die ungeachtet von Umweltbedingungen (Sichtverhältnisse, Zugänglichkeit etc.) in Echtzeit in ausreichend kurzen Messintervallen erfasst werden, um eine ausreichende Vorwarnzeit vor dem Eintritt des Schadereignisses sicherzustellen. Weiters ist in diesem Fall ein Katastrophenschutzplan mit klaren Handlungsanweisungen für alle unterstellten Szenarien zu erstellen. Standards für solche Katastrophenschutzpläne existieren derzeit nur für Rutschungen (ISO/DIS 22327:2017 Draft: Security and resilience – Emergency management – Guidelines for implementation of a community-based landslide early warning system).

17.6.1.1 Steinschlagmodelle

Besondere Bedeutung bei der Bewertung der vom Prozess Steinschlag ausgehende Gefahr kommt den Steinschlagmodellen (Prozessmodellen) zu, da nur mit Ihrer Hilfe die Reichweite und Intensität einer potentiellen Steinschlaggefahr – auch von Extremereignissen – prognostiziert werden können.

Prozessmodelle zur Simulation von Steinschlag (Steinschlagmodelle) existieren seit Mitte der 70er Jahre (z. B. Azimi und Desvarreux, 1977; Piteau und Clayton, 1977). Gegenwärtig steht eine große Anzahl von Modellen sowohl für zwei als auch für drei Dimensionen zur Verfügung (für einen aktuellen Vergleich siehe Tabelle 03 nach Volkwein et al., 2011). Alle gegenwärtigen Modelle beschränken sich auf die Modellierung des eigentlichen Sturzprozesses, der initiale Abbruch (Disposition) wird in den Modellen nicht simuliert, sondern lediglich durch die Anfangsbedingungen (Anfangsposition und Anfangsgeschwindigkeiten) abgebildet. Daher benötigen alle Modelle als Eingabe die potentiellen Ablösebereiche welche mit Hilfe anderer Methoden zu ermitteln sind.

Arten von Steinschlagmodellen

Die Prozessmodelle zur Berechnung bzw. Abschätzung der Reichweite und der Ausbreitung von Steinschlag werden unter anderem in 2D- und 3D-Modelle unterschieden.

Mittels 2D-Modellen können entlang eines Hangprofils (Bemessungsprofils) die Trajektorien von Sturzblöcken berechnet werden. 2D-Berechnungen (Energien, Reichweite, Sprungweite und Sprunghöhen) werden zumeist für die Planung und Dimensionierung sekundärer Schutzmaßnahmen (Netze, Dämme) auf der Hangskala (Objektebene) verwendet. 2D-Modelle können jedoch auch für die Ausweisung von Gefahrenzonen für größere Hangabschnitte (kommuni-

nale Ebene, örtliche Raumplanung) eingesetzt werden. Hierbei werden mehrere repräsentative Hangprofile ausgewählt und die Simulationsergebnisse (z. B. der Verlauf der kinetischen Energien) von diesen Hangquerschnitten mittels Expertenwissen interpoliert (Melzner und Preh, 2012). Schwierigkeiten bei der Anwendung dieses Modelltyps ergeben sich vorwiegend bei der Festlegung des repräsentativen Hangprofils bzw. des adäquaten Abstands von mehreren Hangprofilen zueinander. 2D-Analysen haben darüber hinaus auch eine Bedeutung bei der Überprüfung/Verifikation von 3D-Analysen.

Mit Hilfe von 3D-Modellen können flächendeckende Aussagen über die potentiellen Wirkungsbereiche von Steinschlagprozessen getroffen werden (siehe Abbildung 10). Nachteilig bei der Anwendung von 3D-Modellen ist zum einen der erheblich erhöhte Aufwand für die flächendeckende Datenerhebung und Aufbereitung und zum anderen die Berechnungsdauer, die je nach Modellauflösung bzw. dem Modell zugrunde gelegten Algorithmen hoch sein kann.

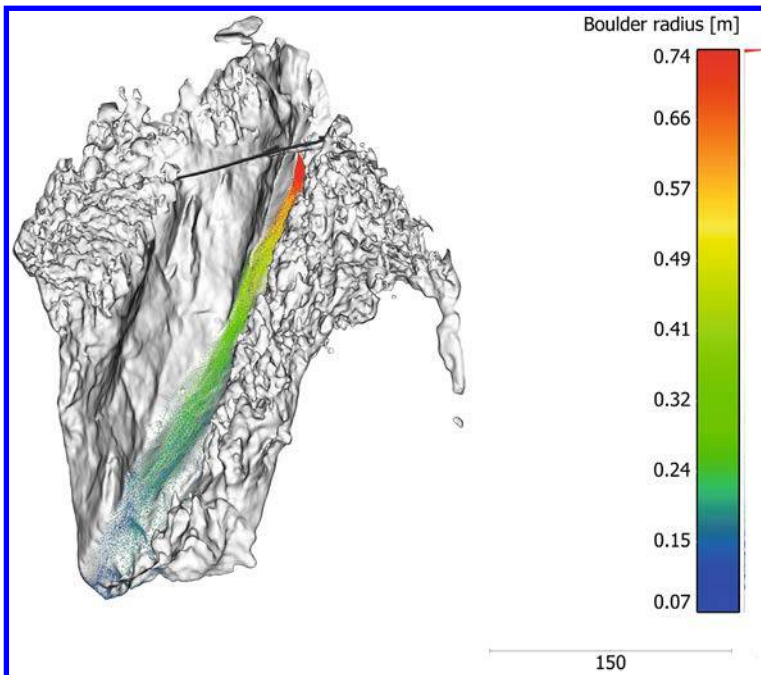


Abbildung 10: Anwendungsbeispiel eines 3D-Modells: Berechnung der Sturzbahnen und der Blockfragmentierung mithilfe des Programms WURF (Fleris und Preh, 2016), simulierte Trajektorien eingefärbt nach der im jeweiligen Bereich auftretenden Blockgröße.

Figure 10: Example of a 3D-model: calculation of trajectories and block fragmentation using the program WURF (Fleris und Preh, 2016), colored trajectories according to the respective block size.

Quelle: Fleris und Preh, 2016

Berechnungsansätze

Ein weiteres signifikantes Unterscheidungskriterium zwischen den unterschiedlichen Steinschlagmodellen ist der Berechnungsansatz, d. h. die mathematische Formulierung und programmtechnische Implementierung des Sturzblocks, des Rückpralls (Dämpfung bzw. Restitution), der Oberflächenrauheit, des Rollwiderstands, etc.

Nach Ihrem Berechnungsansatz werden die Modelle grob in:

- 1) Massenpunktmodelle (»lumped mass approach«),
- 2) Starrkörpermodelle (»rigid body approach«) und in
- 3) hybride Modelle (»hybrid approach«) unterschieden.

Bei den Massenpunktmodellen wird der Block als form- und dimensionsloser Massenpunkt (»lumped mass«) betrachtet. Im Gegensatz dazu wird bei den Starrkörpermodellen der Sturzblock als komplexer Starrkörper (»rigid body«) modelliert. Eine Mischform zwischen diesen beiden Ansätzen stellt der sogenannte hybride Ansatz dar, bei dem der Sturzblock als dimensionsloser Block für die Simulation der Flugbahn, bei der Berechnung des Rückpralls jedoch als Starrkörper (Berücksichtigung von Blockgröße und Form) betrachtet wird.

Der aktuelle Trend in der Entwicklung geht in Richtung komplexer Starrkörpermodelle, bei denen versucht wird, die möglichen Blockformen so naturgetreu wie möglich abzubilden (Andrew et al., 2012; Glover et al., 2012; Vijayakumar et al., 2012). Weitere wesentliche Unterschiede ergeben sich bei den Modellen beispielsweise in der Art, wie wichtige Hangparameter (z. B. Rauheit, Dämpfungseigenschaften) in das Modell integriert sind und ob und wie der Effekt von Bäumen und sekundären Schutzmaßnahmen auf den Sturzprozess berücksichtigt wird. Einige Modelle verwenden einen probabilistischen Ansatz, um die Unsicherheiten in der Qualität der Eingangsparameter besser zu berücksichtigen. Tabelle 03 zeigt eine Auswahl vorhandener Steinschlagmodelle mit ihrem zugehörigen Berechnungsansatz.

Tabelle 03: Auswahl vorhandener Modelle.

Table 03: Selection of existing models.

Quelle: verändert nach Volkwein et al., 2011

Modell/ Programm Name	Referenz	2D/3D	Ansatz	Probabi- listisch	Wald
CRSP (4.0)	Pfeiffer und Bowen, 1989	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Nein
Rockfall 7.1 (2008)	Spang und Sönser, 1995	2D (Profil)	Starr- körper	Ja	Ja
ROFMOD 4.1	Zinggeler et al., 1990	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Ja

((Fortsetzung))

Modell/ Programm Name	Referenz	2D/3D	Ansatz	Probabi- listisch	Wald
3D-GEOTEST-Zinggeler	Krummenacher et al., 2008	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja
RocFall 6.0 (2016)	Stevens, 1998	2D (Profil)	Massen- punkt, Starr- körper	Ja	Ja
Sturzeschwindigkeit	Meißl, 1998	2D (x,y)	Massen- punkt	Nein	Nein
STONE	Guzzetti et al., 2002	3D (x,y,z)	Massen- punkt	Ja	Nein
Rockyfor 3D 5.2 (2014)	Dorren et al., 2006	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja
RAMMS::Rockfall	Christen et al., 2007	3D (x,y,z)	Starr- körper (reale Form)	Ja	Ja
THROW	Preh, 2015	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Ja
WURF	Fleris und Preh, 2016	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja
Pierre	Mitchel und Hungre, 2017	2D (Profil)	Massen- punkt	Ja	Nein
Pierre3D	Gischig et al., 2015	3D (x,y,z)	Massen- punkt	Ja	Nein

Modellierung von Felsstürzen

Der Prozess Felssturz kann mechanisch in den Abbruch und den daraus folgenden Sturzprozess untergliedert werden. Der Abbruch, die Anfangsphase eines Felssturzes, ist maßgeblich von der Fragmentierung der Felsmasse und von den Interaktionen der Komponenten untereinander (entsprechend dem vorherrschenden Versagensmechanismus) geprägt. Der folgende Sturzprozess besteht aus zeitgleichen Steinschlagereignissen, wobei Interaktionen zwischen den einzelnen Sturzblöcken nur einen geringen Einfluss auf den gesamten Sturzprozess ausüben.

Aufgrund ihrer Spezialisierung auf die Modellierung einzelner unabhängiger Felsfragmente können mit klassischen Steinschlagmodellen (entsprechend Tabelle 03) Felssturzprozesse in Ihrer Gesamtheit nicht exakt abgebildet werden. Dies gilt vor allem für die Anfangsphase eines Felssturzereignisses. Solange jedoch Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten während des Sturzprozesses nur im geringen Maße auftreten, kann der dem Abbruch fol-

gende Sturzprozess mit klassischen Steinschlagmodellen ausreichend genau modelliert werden. Dazu ist jedoch eine Abschätzung der durch den Abbruch (Anfangsphase) bestimmten Anfangsbedingungen mit entsprechendem Expertenwissen erforderlich.

Hat das Abbruchereignis einen dominanten Einfluss und/oder spielt die Interaktion der einzelnen stürzenden Fragmente eine wichtige Rolle, dann müssen andere Berechnungsansätze, die Block-Block-Interaktionen und Fragmentierung berücksichtigen können, z. B. die Diskrete Elemente Methode (Cundall und Strack, 1979), eingesetzt werden.

17.6.2 Unsicherheiten

Unsicherheiten ergeben sich aus:

- 1) Fehlender systematischer Erfassung potentieller Gefährdungsbereiche. In der Regel werden Schutzmaßnahmen als Reaktion auf stattgefundenere Ereignisse geplant und umgesetzt. Erst seit 2014 wird in Österreich systematisch an einer Erfassung von Steinschlaggefahren und potentiellen Konflikten mit dem Siedlungs- bzw. Nutzungsraum gearbeitet (Bäk et al. 2015),
- 2) Veralteten Schutzsystemen (sowohl Bemessung als auch technische Lösung),
- 3) Überlastfällen infolge von Extremereignissen,
- 4) Subjektiver Beurteilung einzelner Parameter durch den jeweiligen Sachbearbeiter,
- 5) Modellunschärfen bei der Ermittlung der charakteristischen Einwirkungen,
- 6) Mangelnder Ergebnisvalidierung bei Bemessung (Modellierung),
- 7) Idealierten Bedingungen bei der Charakterisierung des Widerstandes von Schutzsystemen im Rahmen von Bewertungstests (günstige Blockform ohne scharfe Kanten, zentrale Trefferposition),
- 8) Unschärfen bei der Errichtung von Schutzmaßnahmen (z. B. Fundierung von Netzen in engräumig stark variierenden Baugründen etc.).

17.6.2.1 Unsicherheiten in Bezug auf die Kartierung bzw. Erhebung der prozessrelevanten Parameter

Die Unsicherheiten in Bezug auf die Kartierung bzw. Erhebung der prozessrelevanten Parameter können für die erforderlichen Arbeitsschritte wie folgt beschrieben werden:

- 1) Identifikation von stummen Zeugen und Ablösebereichen: stumme Zeugen von Steinschlagprozessen stellen i. d. R. Sturzblöcke am Einhang dar. Die Lage und die Abmessungen dieser Blöcke zur Kalibrierung von Modellen kann mit einfachen Mitteln (GPS, Maßband) gut dokumentiert werden. Um eine Er-

eignisfrequenz/Ereignishäufigkeit abzuleiten, sind die Blockalter grob gem. Tabelle 02 zu klassifizieren. Diese Alterseinstufung ist aufgrund von meist fehlenden analytischen Methoden mit Unsicherheiten aus der gutachterlichen subjektiven Beurteilung behaftet (siehe Abbildung 11).



Abbildung 11: Stumme Zeugen verschiedenen Alters: frisch (a), angewittert (b), alt (starker Bewuchs) (c).

Figure 11: Silent witnesses at different ages: fresh (a), weathered (b), old (heavy natural vegetal cover) (c).

Fotos: WLV Geologie

- 2) Festlegung der Homogenbereiche (Eigenschaften der Sturzbahn): eine Standardisierung ist schwierig, hier sind entsprechende Erfahrungen mit den verschiedenen am Markt erhältlichen Computermodellen in Hinblick auf die Sensitivität der Ergebnisse auf die Auflösung bei der Abgrenzung von verschiedenen Homogenbereichen erforderlich.
- 3) Festlegung des Bemessungsereignisses/der Bemessungsblöcke: Diese ist in der ONR 24810:2017 (2017) klar geregelt. Unsicherheiten und Unschärfen ergeben sich aus der subjektiven Auswahl von Blöcken, die für die statistische Analyse der Blockgrößen herangezogen werden. Dabei können signifikante Differenzen zwischen verschiedenen Bearbeitern beobachtet werden. Abhilfe schaffen hier – geeignete Verhältnisse wie z. B. eine ausreichende Anzahl von am Einhang vorliegenden Blöcken vorausgesetzt – statistische Verfahren wie z. B. Linien- oder Flächenzählverfahren.
- 4) Festlegung des Bemessungszeitraums (relevant bei der Erhebung der stummen Zeugen und daraus resultierend bei der Festlegung des Bemessungsblocks): Die Festlegung des Bemessungszeitraumes ist i. w. eine technisch/gesellschaftliche Konvention. In Anlehnung an die für Hochwasser, Wildbäche und Lawinen gewählten Bemessungszeiträume wird ein Zeitraum von ca. 150 Jahren als sinnvoll angesehen.
- 5) Bestimmung von Frequenzen/Eintrittswahrscheinlichkeiten: siehe Punktation 1). Ergänzend sind hierfür möglichst vollständige Ereignischroniken hilfreich. Diese liegen aber nur in den seltensten Fällen vor.

17.6.2.2 Unsicherheiten in Bezug auf Prozessmodellierung

Aus derzeitiger Sicht besteht kein Grund zur Annahme, dass die am Markt etablierten physikalisch basierten 2D und 3D Modelle Extremereignisse in Hinblick auf die Blockgröße nicht abbilden können. Grundsätzlich gäbe es mehrere Faktoren, die bei Extremereignissen zu Problemen bei der naturgetreuen Abbildung der in der Natur stattfindenden Prozesse führen könnten. Diese sind:

- 1) die Größe der Blöcke. Da für größere Blöcke die Rauheit des Untergrundes geringere Auswirkungen hat als für kleinere, ist eine korrekte Darstellung der tatsächlichen Blockdimensionen bei der Interaktion Boden/Sturzblock entscheidend.
- 2) die Blockgröße in Hinblick auf die Energie, die auf den Boden einwirkt und hier zu entsprechenden elasto-plastischen Verformungen führt. Diese sind abhängig von der Energie.
- 3) Die Interaktion Block/Wald: da diese Interaktion bei jenen Modellen, die eine solche Interaktion abbilden können, i. d. R. energieabhängig bewertet wird, führen extreme Energien bzw. Blockgrößen hier bei der Betrachtung von Einzelblöcken nicht zu Problemen.

Moderne Modelle bilden für Einzelblockstürze die Bodenkontakte und die dabei auftretenden Dämpfungsprozesse physikalisch weitgehend korrekt ab und können daher ohne signifikante Einschränkungen auch Extremereignisse darstellen. Problematisch ist hierbei lediglich der Absturz eines Blockverbandes (Felssturz) zu werten. Im Zuge des Prozesses kann es zu Veränderungen der Topographie (Einschlagtrichter,...) und zu starken Funktionseinbußen des Waldes kommen. Diese könnten in der Modellierung nicht korrekt abgebildet werden.

Kalibrierung der Steinschlagmodelle: In der Regel werden historische Ereignisse in Form von noch vorhandenen stummen Zeugen oder von dokumentierten Ereignissen (Ereignischronik) für die Kalibrierung der Modelle herangezogen. Wenn diese Daten fehlen ist eine Kalibrierung schwierig. Im Umkehrschluss bedeutet das Fehlen von stummen Zeugen aber meist, dass die Ereignisfrequenz gering ist und daher auch die Gefährdung tendenziell gering ist. Teilweise kann hier eine Simulation mit mehreren verschiedenen Modellen mit gut abgesicherten Parametersets Abhilfe schaffen.

Einfluss/Berücksichtigung des Modellfaktors: dem Umstand, dass unterschiedliche Modelle unterschiedliche Ergebnisse liefern, kann nur mit entsprechend großer Erfahrung und einer Plausibilisierung von Modellergebnissen begegnet werden. So existieren zahlreiche Datensätze von 1:1 Sturzversuchen mit einer guten Dokumentation der Geschwindigkeit und Sprunghöhen (Smith

und Duffy, 1990), die dabei für verschiedenen Untergründe und Hangneigungen beobachtet wurden. Die Modellergebnisse sind daher jedenfalls mit solchen gemessenen Daten in Hinblick auf ihre Plausibilität zu prüfen. Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass die Variabilität der Modellergebnisse weniger vom Modell selbst als vom Anwender abhängt (Berger und Dorren, 2007).

Behandlung von Ausreißern der Modellierung bei der Gefahrenzonen-Abgrenzung: Für die Ausscheidung von Gefahrenzonen oder qualitativen Gefahren-Hinweisbereichen sind die Modellergebnisse entsprechend zu bewerten. Bei einer ausreichenden Anzahl von modellierten Blöcken kann i. d. R. ein konvergentes Ergebnis erzielt werden, das auch reproduzierbar ist. Gibt es bei so einem Ergebnis Ausreißer, die sehr untypische Reichweiten zeigen, ist es vertretbar, solche Modellergebnisse zu eliminieren. Es ist zwar durchaus möglich, dass die Modelle auch solche extremen Ereignisse korrekt darstellen, die Eintrittswahrscheinlichkeit solcher extremen Ergebnisse, die meist in Kaskaden von ungünstigen Parameterkombinationen begründet sind, ist jedoch sehr gering und daher nicht zwingend relevant für die Darstellung von Gefahrenzonen.

17.6.3 Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen

In Hinblick auf einen bevorstehenden bzw. bereits erkennbaren Klimawandel mit einer Häufung von extremen Wetterphänomenen kann mit hoher Wahrscheinlichkeit auch von einem Anstieg von Extremereignissen – auch bei Sturzprozessen – ausgegangen werden. In Anbetracht des Charakters der Bemessung von Schutzbauwerken auf ein »Bemessungsereignis«, das wiederum eine definierte Wiederkehrperiode aufweist, muss darauf hingewiesen werden, dass mit dem retrospektiven Charakter dieser Festlegung nur sehr bedingt auf signifikante Änderungen der Magnitude und Frequenz von Schadensereignissen eingegangen werden kann. Daher wäre gegebenenfalls ein Überdenken des »Bemessungsereignisses« notwendig, um mittel- bis langfristig das derzeit existierende Sicherheitsniveau zu halten.

Ähnliche Einschränkungen sind in Hinblick auf eine progressive Siedlungsentwicklung gültig. Hier kann über einen risikobasierten Ansatz eine Lösung angeboten werden. Das heißt, dass die errichteten Schutzmaßnahmen zu einem definierten (akzeptablen) Restrisiko führen (vgl. ÖGG, 2014), das auf das bestehende Schadenspotential abgestellt ist. Wird durch die Siedlungsentwicklung das Schadenspotential erhöht, müssen bei der Überschreitung des akzeptablen Restrisikos die bestehenden Schutzmaßnahmen entsprechend nachgezogen und verbessert werden. Hierzu wäre jedoch bei allen Schutzprojekten eine Ermittlung des nach Realisierung der Maßnahmen bestehenden Restrisikos durchzuführen. Dies ist derzeit in Österreich nur in Ausnahmefällen gegeben.

Zu einem zukünftigen veränderten Freizeitverhalten mit einer erhöhten Risikobereitschaft ist festzuhalten, dass es sich hierbei um ein freiwillig eingegangenes, individuelles Risiko handelt. Die Entscheidung hierüber ist in der Regel von Einzelpersonen zu treffen und lässt sich nur in Ausnahmefällen institutionell regeln. Häufen sich jedoch Fälle von extremen Risiken in diesem Bereich, kann es dennoch zu normierten Vorgangsweisen beim Umgang mit diesen Naturgefahren kommen (vgl. Lawinenwarnstufen mit entsprechenden Verhaltensempfehlungen für Skitouristen, Wanderwege-Tool Tirol für steinschlagexponierte Wanderwege mit einem abgestuften akzeptablen Restrisiko in Abhängigkeit von der Schwierigkeit des betroffenen Wanderweges – vgl. LOLA, 2018 etc.).

17.7 Perspektiven für Handlungsoptionen

In den allermeisten Fällen ist es auch mit aufwändigen Schutzmaßnahmen nicht möglich, eine vollständige Abdeckung von Risiken aus Steinschlag- und Felssturzprozessen zu erreichen. Neben der oft nicht gegebenen Machbarkeit sind hierbei vor allem Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit der Schutzmaßnahmen und die Relation von Kosten und Restrisiken bei verschiedenen Maßnahmenvarianten maßgeblich (EconoMe 4.0, o. J.). Aus diesen Gründen sieht z. B. auch der Eurocode 7 (ÖNORM EN 1997-1:2014) vor, dass in Abhängigkeit vom Schadenspotential beim Versagen eines Bauwerks (im Überlastfall) eine bestimmte Zuverlässigkeitsklasse des Bauwerks anzustreben ist. Dies bedeutet, dass die akzeptable Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerkes – und hier werden auch Hochbauten wie z. B. Wohnhäuser betrachtet – mit steigendem Schadenspotential geringer werden sollte. Diese in Ingenieurskreisen durchaus übliche Denkweise ist jedoch häufig schwierig zu kommunizieren, vor allem, wenn es zu Schadensfällen mit Betroffenen kommt. Dann ist jeder Sachschaden inakzeptabel und jedes Menschenleben unersetzlich. Es gilt daher, in der Bevölkerung ein besseres Bewusstsein für solche bestehenden Restrisiken zu schaffen und diese auch klar und deutlich zu kommunizieren.

Häufig ist es hilfreich, Vergleiche zu Risiken in einem anderen Kontext zu ziehen. So ist die Teilnahme am Straßenverkehr als eine der gefährlichsten Aktivitäten, die man in Mitteleuropa ausüben kann, einzustufen. Dabei werden Personenschaden-Risiken in Kauf genommen, die oft mehrere Zehnerpotenzen größer sind als jene, die Personen im Kontext mit Naturgefahren als inakzeptabel einstufen.

Um eine klarere Vorstellung von den Unsicherheiten und Unschärfen, die bei der Bewertung von Naturprozessen unvermeidbar sind, zu bekommen und auch für alle Nachnutzer einer Expertise zugänglich zu machen, sollte besonderes

Augenmerk auf eine nachvollziehbare Vorgangsweise bei den Erhebungs- und Bemessungsprozessen gelegt werden. Im Wesentlichen ist dies bei Beachtung der in der ONR 24810:2017 beschriebenen Vorgangsweise gegeben. So sollte z. B. eindeutig beschrieben und verortet sein, wo die Blöcke vermessen wurden, die für die Bestimmung der Bemessungsblockgröße herangezogen wurden. Die Bestimmung der Ereignisfrequenz sollte ebenso eindeutig über Chronik- oder Geländedaten dokumentiert werden, wie die Dokumentation der Lage von den für die Kalibrierung des Modells bzw. der Validierung der Ergebnisse herangezogenen Blöcke.

Literatur

- Andrew, R., Hume, H., Bartingale, R., Rock, A., Zhang, R., 2012. CRSP-3D User's Manual Colorado Rockfall Simulation Program. Federal Highway Administration Report CO 80228FHWA-CFL/TD-12-007. Lakewood, Colorado, S. 163.
- ARE, BWG, BUWAL, 2005. Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren. Bundesamt für Raumentwicklung, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 48 S.
- Azimi, C., Desvarreux, P., 1977. Calcul de chutes de blocs et vérification sur modèle réduit, Internal Technical Report ADRGT.
- Bäk, R., Braunstingl, R., Hagen, K., Kociu, A., Kolmer, C., Melzner, S., Mölk, M., Preh, A., Schwarz, L., 2015. Materialien und Arbeitspapiere – Arbeitsgruppe Geologie. In: ÖROK (Hrsg.), Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung. ÖROK Schriftenreihe, 193, S. 155–195.
- Berger, F., Dorren, L., 2007. Principles of the tool Rockfor.net for quantifying the rockfall hazard below a protection forest. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 158(6), S. 157–165. DOI: 10.3188/szf.2007.0157.
- Bourrier, F., Dorren, L., Hungr, O., 2013. The use of ballistic trajectory and granular flow models in predicting rockfall propagation. Earth Surface Processes and Landforms, 38, S. 435–440.
- Bozzolo, D., 1987. Ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Dynamik von Steinschlag. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 8490.
- BRP, BWW, BUWAL, 1997. Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen 1997. Bundesamt Raumplanung, Bern, 42 S.
- Christen, M., Bartelt, P., Gruber, U., 2007. RAMMS – a modelling system for snow avalanches, debris flows and rockfalls based on IDL. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 4, S. 289–292.
- Corominas, 2005. Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. Landslides, 2, S. 343–357.
- Corominas, J., Mavrouli, O., 2011. Rockfall quantitative risk assessment. In: S. Lambert, F. Nicot (Hrsg.), Rockfall engineering. Wiley, New York, S. 252–284.
- Cundall, P.A., Strack, O.D., 1979. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. Geotechnique, 29, S. 47–65.

- Domaas, U., 1985. Rekkevidden av steinsprang. Oslo. NGI, 58500-1, 17 S.
- Dorren, L., Berger, F., Putters, U.S., 2006. Real-size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, S. 145–153.
- EconoMe 4.0, o. J. Wirtschaftlichkeit von Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren. Schweizer Eidgenossenschaft, Bundesamt für Umwelt. https://econome.ch/eco_work/index.php [12.12.2018].
- Egli, T., 2005. Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren. Wegleitung kantonale Gebäudeversicherung, St. Gallen.
- ETAG027, 2008. European Technical Assessment of Rock-Fall Protection Kits. European Organization for Technical Approvals.
- Evans, S.G., Hungr, O., 1993. The assessment of rockfall hazards at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, S. 620–636.
- Fleris, M., Preh, A., 2016. WURF_LIVE: Demonstration of a stochastic numerical rockfall code in 3D. In: H. Ortner (Hrsg.), *Abstract Volume of GeoTirol2016 – Annual Meeting of DGGV and PANGEO Austria*. Innsbruck, S. 69.
- Gischig, V., Hungr, O., Mitchell, A., Bourrier, F., 2015. Pierre3D – a 3D stochastic rock fall simulator based on random ground roughness and hyperbolic restitution coefficients. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(9), S. 1360–1373. DOI: 10.1139/cgj-2014-0312.
- Glover, J., Schweizer, A., Christen, M., Gerber, W., Leine, R., Bartelt, P., 2012. Numerical investigation of the influence of rock shape on rockfall trajectory. *Geophysical Research Abstracts*, 14, EGU2012-11022-1.
- Grundner, M., 1984. Ein Beitrag zu Beurteilung von Naturgefahren im Hinblick auf die Erstellung von mittelmäßstäbigen Gefahrenhinweiskarten (mit Beispielen aus dem Berner Oberland und der Landschaft Davos). *Geographica Bernensia*, G23.
- Gruner, U., 2008. Klimatische und meteorologische Einflüsse auf Sturzprozesse. *Interpraevent*, S. 147–158.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, 28, S. 1079–1093.
- Heim, A., 1932. *Bergsturz und Personenleben*. Fretz & Wasmuth, Zürich.
- Hsü, K.J., 1975. Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, 86, S. 129–140.
- Interpol, 2009. *Disaster Victim Identification Guide*, 1(4), S. 3.
- KatSG, 1999. *Katastrophenschutzgesetz – Gesetz über die Gefahrenabwehr bei Katastrophen*, §2(1).
- Kienholz, H., Zeilstra, P., Hollenstein, K., 1998. *Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko*, Arbeitspapier. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Eidgenössische Forstdirektion, Bern.
- Krummenacher, B., Schwab, S., Dolf, F., 2008. Assessment of natural hazards by three calculations of rockfall behaviour. In: A. Volkwein, V. Labiouse, K. Schellenberg (Hrsg.), *Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Morschach, Schweiz, S. 49–51.
- Land Niederösterreich, 2018. *NÖ Atlas*. <http://atlas.noe.gv.at> [13.12.2018].

- LOLA Peak Solutions, 2018. Bericht: Anwendungsbeispiel: Wander-Wege-Werkzeug zur Risikobeurteilung am Weg Nr. 222, Zustieg Bettelwurfhütte. Projektbericht im Auftrag von Amt der Tiroler Landesregierung, Alpenverein Österreich.
- Meißl, G., 1998. Modellierung der Reichweite von Felsstürzen – Fallbeispiele zur GIS-unterstützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. Innsbrucker Geographische Studien IGS, 28, 249 S.
- Melzner, S., Preh, A., 2012. Sturzmodelle und ihre Anwendbarkeit in der Praxis. Wildbach- und Lawinenverbau. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz., 169, S. 78–97.
- Mitchell, A., Hungr, O., 2017. Theory and calibration of the Pierre 2 stochastic rock fall dynamics simulation program. Canadian Geotechnical Journal, 54(1), S. 18–30, DOI: 10.1139/cgj-2016-0039.
- Mölk, M., Rieder, B., 2017. Steinschlag-Gefahrenzonen in Österreich. Erfahrungen, Probleme und Lösungsansätze bei der Entwicklung einer standardisierten Vorgangsweise. Geomechanics and Tunnelling 10(1), S. 24–33.
- ÖGG, 2014. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Empfehlung für das Schutzziel bei gravitativen Naturgefahren in Österreich.
- ÖNORM EN 1997-1:2014, 2014. Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln. ON-Institut (Hrsg.).
- ONR 24810:2017, 2017. Technischer Steinschlagschutz: Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung.
- Pamminger, P., 2018. Untersuchungen zum Einfluss der Blockfragmentierung am Beispiel der Liechtensteinklamm mithilfe des Berechnungsansatzes WURF. Diplomarbeit, Institut für Geotechnik, TU Wien (in Ausarbeitung).
- Pfeiffer, T., Bowen, T., 1989. Computer Simulation of Rockfalls. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 26(1), S. 135–146.
- Piteau, D.R., Clayton, R., 1977. Discussion of paper »Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data« by P.A. Cundall, M.D. Voegele, C. Fairhurst. 16th Symposium on Rock Mechanics, Minneapolis, S. 62–63.
- Poisel, R., Preh, A., 2004. Rock Slope Initial Failure Mechanisms and their Mechanical Models. Felsbau, 22(2), S. 40–45.
- Preh, A., 2015. THROW, ein dynamisch stochastisches Simulationsmodell zur Prognose von Steinschlag. (unveröffentlichtes Benutzerhandbuch)
- Preh, A., 2016. Rock Slopes: Detachment and Runout (Felsböschungen: Abbruch und Sturzprozess). Habilitationsschrift, Technischen Universität Wien, Lehrbefugnis für das Fach »Angewandte Felsmechanik«, Fakultät für Bauingenieurwesen.
- Preh, A., Mölk, M., 2018. Steinschlagmodelle. In: Geologische Bundesanstalt (Hrsg.), Tagungsband Gefahren durch Steinfall und Felssturz. Berichte der Geologischen Bundesanstalt 125, S. 18–24.
- Rauscher, R., 2018. Planung, Ausrichtung und Durchführung eines Steinschlag-Sturzversuches zur Kalibrierung von 3D-Steinschlagsimulationen unter besonderer Berücksichtigung der ONR 24810:2017. Masterarbeit, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Rudel, E., 2008. Einige Gedanken zur Frage der Zunahme der meteorologischen Extremwerte, Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft.

- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, S. 83–91.
- Sass, O., Oberlechner, M., 2012. Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, S. 3209–3216.
- Smith, D.D., Duffy, J.D., 1990. Field tests and evaluation of rockfall restraining nets. California Department of Transportation, Final Report, CA/TL, 90(5).
- Spang, R., Sönsler, T., 1995. Optimized rockfall protection by »Rockfall«. In: Eight congress of the International Society for Rock Mechanics, Tokyo, 3, S. 1233–1242.
- Stevens, W.D., 1998. Rocfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls. Masterarbeit, University of Toronto. <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/uploads/7756.pdf> [14. 11. 2018].
- T-KMG, 2006. Tiroler Katastrophenmanagementgesetz, LGBl. Nr. 33/2006, §2 (1).
- Usiro, T., Kusumoto, M., Onishi, K., Kinoshita, K., 2006. An experimental study related to rock fall movement mechanism. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, F, 62(2), S. 377–386.
- Vijayakumar, S., Yacoub, T., Ranjram, M., Curran, J.H., 2012. Effect of rockfall shape on normal coefficient of restitution. 46th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Chicago, Illinois, 8 S.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L., Gerber, W., Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall characterization and structural protection – a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, S. 2617–2651.
- Zinggeler, A., Krummenacher, B., Kienholz, H., 1990. Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern, *Berichte und Forschungen der Geographisches Institut der Universität Freiburg*, 3, S. 61–70.