

# Bergstürze - Begriff, Ursachen und Einflussfaktoren, Prozessauslösung, Häufigkeit, Prozesskette und Umgang mit Bergsturzsproblematik (Beitrag AGN)

Ueli Gruner<sup>1</sup>, Klaus Louis<sup>2</sup>, Brian McArdell<sup>3</sup>

**Stichworte:** Bergsturz, Prozessauslösung, Bergsturzsgefährdung, Klimafaktoren

## Zusammenfassung

In einem ersten Teil wird der Begriff Bergsturz erläutert, welcher in der Schweiz nur für Stürze von einer Kubatur von über 1 Mio. m<sup>3</sup> angewendet wird. In einem zweiten Teil wird auf die Ursachen und Einflussfaktoren von Bergstürzen eingegangen. Dabei wird ein Schwergewicht auf die Beschreibung der geologischen und morphologischen Disposition gelegt. Stichworte dazu sind lithologische und tektonische Vorkonditionierung und Einfluss der Schwerkraft auf die Entfestigung des Gebirges. Diese Faktoren bewirken eine kontinuierliche oder auch stufenweise verlaufende, meist sehr lang andauernde Schwächung des Gebirges vor allem durch verschiedene Verwitterungsprozesse, bis der Fels «reif» zum Abbruch ist. Die unmittelbare Prozessauslösung – der «Trigger» – erfolgt in vielen Fällen über das Wasser, untergeordnet z.B. auch durch Erdbeben. Inwiefern das Auftauen des Permafrostes solch grosse Prozesse direkt auslösen kann, ist nicht geklärt. Es muss deshalb offen bleiben, ob bei einer weiter fortschreitenden Klimaerwärmung Bergsturzeignisse häufiger werden. Grundsätzlich jedoch sind Bergstürze sehr selten; auf Grund der historischen Daten ist in der Schweiz pro Dekade (10 Jahre) mit einem bis zwei Bergstürzen zu rechnen.

Ein wichtiger Aspekt bei der Gefahrenbetrachtung von Bergstürzen sind die damit verbundenen, möglichen Prozessketten. Es werden verschiedene, auch aktuelle Beispiele aufgeführt. In einem abschliessenden Kapitel wird angeregt, potenzielle Bergsturzsgebiete detaillierter zu erkunden und allenfalls, im Sinne einer Früherkennung von sich akzentuierenden Gefahrensituationen, periodisch mittels geeigneter Messmethoden zu überwachen.

## Abstract

In the first section, the term rock avalanche (Bergsturz) is explained, and its use in Switzerland for events with volumes over 1 million m<sup>3</sup> which should generally be determined by the initial landslide volume. In the second section, the causes and influencing factors of rock avalanches are discussed. The emphasis is placed on the description of geological and morphological disposition. Tectonic preconditioning and the influence of gravity on the weakening of the rock mass are key elements of the disposition. These factors cause a continuous or step-wise long-duration weakening of the rock mass in the initiation zone, especially through various weathering processes, until the rock mass is «ripe» for failure. The initiation of the rock avalanche, or trigger, is generally caused by water in the rock mass, or less often by earthquakes. It is not clear to which extent the thawing of permafrost ice can directly trigger such large processes. It therefore remains unclear how the frequency of large events such as rock avalanches will increase as global warming continues. Basically, rock avalanches are very rare, with one to two events per decade occurring in Switzerland.

An important part of the hazard analysis for rock avalanches is the possible chain of processes associated with these events. Several recent examples are briefly described. In a concluding section, it is suggested that potential rock avalanche zones should be explored in more detail, and, if the hazard situation worsens, monitoring should be considered.

<sup>1</sup> Kellerhals + Haefeli AG, Kapellenstrasse 22, 3011 Bern, e-mail: ueli.gruner@k-h.ch

<sup>2</sup> Louis Ingenieurgeologie GmbH, Weiherstrasse 4, 6353 Weggis

<sup>3</sup> Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf

# 1 Einleitung

Ein Bergsturz ist ein relativ seltenes Ereignis und trotzdem von öffentlicher, grosser Bekanntheit. Der nachfolgende Beitrag gibt eine Übersicht zum Thema und liefert wichtige geologische Inputs. Dabei werden folgende Aspekte näher betrachtet werden:

- Begriff Bergsturz
- Ursachen und Einflussfaktoren von Bergstürzen (inkl. Klimafaktoren)
- Prozessauslösung
- Häufigkeit von Bergstürzen
- Mögliche Prozessketten in der Folge von Bergstürzen
- Umgang mit der Bergsturzproblematik

Ergänzend ist darauf hinzuweisen, dass im Swiss Bulletin für angewandte Geologie, das Thema «Bergstürze» bereits verschiedentlich abgehandelt wurde (Keusen 1998, Keusen et al. 1998, Bollinger 2006, Gruner 2006, Thuro et al. 2006, Gander 2007).

## 2 Begriff Bergsturz

### 2.1 Volumen

Als Bergsturz wird in der Schweiz ein grossvolumiger Sturzprozess aus einem Felsverband mit einer Kubatur von mindestens 1 Mio. m<sup>3</sup> bezeichnet. Nicht selten werden dabei Geschwindigkeiten von über 40 m/s erreicht (BAFU 2016).

Früher wurde in Fachkreisen auch Massenbewegungen und Sturzereignisse mit deutlich geringerem Volumen als Bergsturz bezeichnet, so z.B. von Albert Heim in seinem noch heute aktuellen Standardwerk von 1932 «Bergsturz und Menschenleben». Heute wird, vor allem in Nichtfachkreisen, der Begriff Bergsturz fälschlicherweise auch bei Ereignissen mit Ausbruchvolumina <1 Mio. m<sup>3</sup> verwendet. Immer wieder zu Verwirrung führt der Umstand, dass im angelsächsischen Raum

der Begriff Bergsturz nicht gleich angewendet wird wie in der Schweiz. So ist z. B. in vielen englischen Publikationen der Ausdruck **rock avalanche** für grössere, katastrophenartig eintretende Ereignisse zu finden (Hungry et al. 2014), ohne dass damit eine präzise Volumengrenzung verknüpft wird. Auch die Begriffe **rockslide** oder **rock fall deposits** werden häufig verwendet, ebenfalls ohne genauere Quantifizierung. Evans et al. (2006) nennen grosse Sturzereignisse mit einem Volumen von über 100'000 m<sup>3</sup> und einer hohen Geschwindigkeit **Massive Rock Slope Failure (MRSF)**, ein Begriff, der heute von verschiedenen anderen Autoren verwendet wird, so auch von Keller (2017) für seine Untersuchungen von grossen Sturzereignissen in der Innerschweiz. Beizufügen ist hier, dass damit eigentlich nur das Versagen bezeichnet wird und nicht der Sturzprozess als solcher.

Die AGN vertritt die Auffassung, dass in der Schweiz die Bergstürze grundsätzlich über das Volumen (>1 Mio. m<sup>3</sup>) zu definieren sind, wobei in aller Regel hohe Geschwindigkeiten auftreten (vgl. nachfolgendes Kapitel zur Ablagerung von Bergstürzen sowie PLANAT 2018). Die Bestimmung der Kubatur ist dabei generell über das Ausbruchsvolumen am Felsverband selbst festzulegen, wie das heute auch meist der Fall ist. Allerdings erfolgten bei vielen Beschreibungen von älteren Bergsturzergebnissen die Angaben der Kubatur über eine Abschätzung des Ablagerungsvolumens.

Ebenfalls zum Begriff Bergsturz werden grosse Felsrutschungen gerechnet wie z. B. das katastrophale Ereignis von Goldau 1806. Hier glitten – als initialer Prozess – auf einer mit 15° bis 30° talwärts einfallenden Schichtfläche rund 30 bis 40 Mio. m<sup>3</sup> Felsmaterial talwärts. Diese Masse entwickelte sich nachfolgend zu einem Sturz mit grosser Geschwindigkeit und Reichweite (Thuro et al. 2006, Bollinger 2006).

## 2.2 Ablagerung

Bezeichnend für den Prozess eines Bergsturzes sind einerseits die hohe auftretende Geschwindigkeit der Sturzkörper, andererseits auch die häufig umfangreiche Prozessfläche bzw. die oft grosse Reichweite eines solchen Ereignisses: Das Felsmaterial bewegt sich zuerst als Sturzstrom talwärts und breitet sich anschliessend, in Abhängigkeit der Geländeoberfläche, im Talboden aus bzw. gelangt oft mehrere Kilometer weit ins ein Tal hinab, wo es sogar am Gegenhang aufbranden kann. Dabei gilt grundsätzlich der von Scheidegger (1973) entwickelte Zusammenhang zwischen dem Volumen eines Bergsturzes und dessen Reichweite. Vereinfachend bedeutet dies: Je grösser das Volumen eines Sturzes ist, desto grösser ist in der Regel auch dessen Reichweite bzw. desto geringer ist das Pauschalgefälle («Fahrböschung» gemäss Heim 1932). Grosse Reichweiten sind u. a. auch auf die starken Wechselwirkungen zwischen den Sturzkomponenten und der daraus resultierenden Dynamik zurückzuführen.

Ausnahmen von solchen typischen Abläufen bestätigen die Regel. Bei den beiden Bergstürzen von Randa (VS) 1991 waren trotz grosser Abbruchvolumina von 20 Mio. m<sup>3</sup> bzw. 10 Mio. m<sup>3</sup> die Reichweite des Sturzmaterials und die Grösse des Ablagerungsraumes eher gering, dies vor allem deshalb, weil die Abbrüche jeweils in Form von mehreren grossen Teil-Felsstürzen erfolgten (Schindler et al. 1993).

Nicht selten führen solche Grossereignisse auch zu einem Aufstau von Bächen und Flüssen, was die Gefahr eines Wasserausbruchs bzw. eines Murganges nach sich zieht (vgl. Bergstürze von Randa 1991; in: Schindler et al. 1993 und Bergsturz Sandalp 1996, in: Keusen 1998). Beim Bergsturz von Goldau löste die Druckwelle der Gesteinsmasse möglicherweise eine Flutwelle im nahe gelegenen Lauerzersee aus. Ein solcher «Tsunami»

könnte gemäss Bussmann & Anselmetti (2010) auch infolge des Impaktes der Sturzmasse in das vorgelagerte Sumpfbereich mit seitlicher Verdrängung des torfigen Materials ausgelöst worden sein. Prozessketten können, wie z. B. beim Bergsturz vom Pizzo Cengalo, zu grossen Schäden in talwärts liegenden Gebieten führen (vgl. auch Kapitel 5).

## 3 Ursachen und Einflussfaktoren von Bergstürzen

### 3.1 Geologische Disposition

Grundsätzlich steht bei der Ursachenanalyse eines Bergsturzes die geologische Disposition im Vordergrund. Diese beinhaltet die Art des Felsens und dessen Beschaffenheit, den Schichtaufbau und die Schichtneigung. Ferner spielt auch die lithologische Zusammensetzung des Gesteins eine massgebliche Rolle: Gemäss einer Zusammenstellung in Gruner (2006) brachen von den (heute) etwas über 230 dokumentierten Bergstürzen im Alpenraum rund  $\frac{2}{3}$  aus Sedimentgestein aus (vorwiegend Kalke und Dolomite) und rund  $\frac{1}{3}$  aus Kristallingestein. Anzuführen ist, dass aus duktil verformten Schiefergesteinen wie z.B. Bündnerschiefer kaum grosse Bergsturzereignisse zu erwarten sind.

Andererseits stellt auch die tektonische Vorconditionierung ein wichtiger Faktor bezüglich Disposition dar: Bei den Gebirgsbildungsprozessen vor Millionen von Jahren sind ausgeprägte Trennflächen und Bruchzonen entstanden. Wird nun die Flanke eines solchen Gebirges allmählich steiler, z. B. durch Verwitterungs- und Erosionsprozesse (Wasser/Gletscher), oder erfolgt eine Hangentlastung durch das Zurückschmelzen eines Gletschers, kommt die Schwerkraft der Felsmasse allmählich immer mehr zum Tragen (Zunahme der treibenden Kräfte).

Neben den detaillierten Gebietskenntnissen der örtlichen Geologen stehen zum besseren

Verständnis der geologischen Disposition auch öffentlich zugängliche Grundlagendaten zur Verfügung. Dazu gehören insbesondere die Blätter des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 sowie die flächendeckend vorhandenen Vektordaten GeoCover auf [www.map.geo.admin.ch](http://www.map.geo.admin.ch). In Kombination mit Orthophotos und digitalen Geländemodellen bzw. Hangneigungskarten lässt sich die geologische Disposition weiter charakterisieren und im Falle eines Ereignisses auch anschaulich der Öffentlichkeit erklären.

### 3.2 Morphologische Disposition

Unter dem Einfluss der Schwerkraft der Gesteinsmassen findet – in Abhängigkeit der tektonischen Vorkonditionierung des Felsens – eine spröde Verformung des Felsverbandes bzw. ein Kriechen entlang von vorhandenen Schwächezonen im Fels statt. Dadurch resultiert ein allmählicher Abbau der Scherfestigkeit, was sich z.B. durch das Brechen von unzähligen Gesteinsbrücken manifestieren kann. Die rückhaltenden Kräfte werden auf diese Weise kontinuierlich verringert. Diese Entfestigung von ungestützten Felsmassen läuft je nach tektonischer Vorkonditionierung über verschiedene kinematische Prozesse unterschiedlich stark bzw. schnell ab. Wenn der Widerstand einen kritischen Punkt erreicht, kommt es zu einem allmählichen Versagen des Felsverbandes und somit letztlich zur Auslösung des Sturzes. Ein solcher Bruch kann grundsätzlich unabhängig von einem klar erkennbaren Auslösfaktor stattfinden.

### 3.3 Verwitterungs- und Erosionsprozesse

Die Verwitterungs- und Erosionsprozesse eines Felskörpers können hunderte, tausende oder sogar zigtausende von Jahren dauern. Bei einer entsprechenden Höhenlage können auch Frost-Tau-Zyklen die Trennflächensysteme schwächen bzw. ausweiten. Diese Prozesse beeinflussen den Zustand in den Bruchsystemen, schwächen verbleiben-

de Gesteinsbrücken und können deshalb einen Abbruch beschleunigen.

### 3.4 Klimafaktoren

Der Einfluss des Klimas auf die Sturzaktivität ist vielschichtig und komplex. Das Klima verändert sich mittel- bis langfristig. Seit Beginn des Eiszeitalters vor 2.6 Mio. Jahren hat es wahrscheinlich 15 verschiedene Eiszeiten gegeben (mit entsprechend vielen Warmzeiten dazwischen). Zudem beeinflussen oftmals kurzfristige klimatische und meteorologische Extremwerte die Naturgefahrensituation. Relevante Veränderungen für einen Bergsturz können die Temperaturen, die Niederschlagsmenge, die Niederschlagsintensität, die Schneemenge oder der Gletscherrückgang sein. Diese Faktoren wirken direkt oder indirekt und sie haben eine unterschiedliche Verteilung in Raum und Zeit. Der Rückgang der Gletscher hatte im Pleistozän und im Holozän wiederholt einen Einfluss auf die Stabilität der Hänge, insbesondere in klimatischen Übergangsphasen. Viele grosse Bergstürze, so auch das 500 Mio. m<sup>3</sup>-Ereignis von Chironico (TI) vor rund 13'500 Jahren, waren im Spätglazial beim ersten Rückzug der grossen Alpengletscher zu verzeichnen (Gruner 2006). Grosse rezente Massenbewegungen wurden z.B. auf Grund des Eisverlusts des Aletschgletschers (Moosfluh-Rutschung) und des unteren Grindelwaldgletschers (Eigerostflanke) registriert. Durch den Gletscherrückzug fehlt in diesen Fällen die Stützwirkung.

Was das Auftauen des Permafrosts anbelangt, zeigen Messresultate, dass die aktuelle Klimaerwärmung bis in grössere Tiefen des Gebirges festzustellen ist (20 - 40 m; vgl. Fig. 1). Mit der sommerlichen Erwärmung von Felsmassen kann die thermisch bedingte Ausdehnung einerseits Verwitterungsprozesse beschleunigen, andererseits sind im hochalpinen Raum in Höhen ab rund 2400 m ü. M. auch erhöhte Sturzaktivitäten – meist kleineren Ausmasses – festzustellen.

### 3.5 Unmittelbare Prozessauslösung

Die unmittelbar bevorstehende Auslösung von Sturzprozessen äussert sich in der Regel durch eine deutliche Geschwindigkeitszunahme der Felsmasse. Diese Zustandsänderung kann beispielsweise innerhalb von einigen Stunden, d.h. sehr kurzfristig, erfolgen. Der Trigger, der diesen Sturzprozess auslöst, kann ganz unterschiedlicher Natur sein:

#### Wasser

Einen gut dokumentierten Trigger stellen grosse Einträge von Wasser dar. Diese können bei ergiebigen Niederschlägen und der Schneeschmelze zu einer markanten Erhöhung des Kluftwasserdruckes bzw. des hydrostatischen Bergwasserdruckes (Gruner 2008) und zu einer Reduktion der Scherwiderstände führen (z. B. kontinuierlicher Abbau von Gesteinsbrücken). In vielen Fällen wirkt ein solcher Wassereintrag ins Gebirge wie ein Katalysator: Weil die Felsmasse auf Grund verschiedener Einflussfaktoren ohnehin «reif» war für den Abbruch, stellen die Wassereinträge oft nur noch den letzten Anstoss dafür dar. Bei rund der Hälfte der historisch dokumentierten Bergstürze – vielfach sind es solche mit bedeutenderen Schadenfolgen – werden Nässeperioden als Prozessauslöser betrachtet (Gruner 2006). Das bekannteste Beispiel ist der Bergsturz von Goldau 1806, als nach einem schneereichen Winter und einer langen Regenperiode eine Felsmasse

von etwa 30 bis 40 Mio. m<sup>3</sup> auf einer relativ flach geneigten Schichtfläche abglitt und anschliessend talwärts stürzte, was 457 Menschenleben forderte.

#### Erdbeben

Mögliche Trigger von Bergstürzen können, wenn auch eher selten, Erdbeben sein. Ein gut dokumentiertes Beispiel eines durch Erdbeben induzierten Bergsturzes in der Schweiz ist das Ereignis nahe des Rawilpasses (Six des Eaux Froides, VS) am 30. Mai 1946: Nach dem zweiten starken Erdbeben im Raum Siders im gleichen Jahr – das erste hatte eine Magnitude  $M = 5.8$  und das zweite eine solche von  $M = 5.5$  – stürzten dort in unbewohntem Gebiet ca. 4 bis 6 Mio. m<sup>3</sup> Felsmaterial ab. Ein weiteres Beispiel eines Erdbebentriggers ist der Bergsturz von Fadalto in Venetien (Italien) 1873, als nach einem Starkbeben (Magnitude unbekannt) gegen 50 Mio. m<sup>3</sup> Fels zu Tale stürzten.

In den letzten Jahren wurde auch das Auftauen von Permafrost als möglicher Trigger von Bergstürzen gedeutet. Was den Bergsturz 2017 am Pizzo Cengalo anbetrifft, wird weiter unten noch darauf eingegangen. Kenner & Philipps (2017) gehen auf Grund ihrer Untersuchungen von verschiedenen Ereignissen bzw. Messergebnissen im hochalpinen Raum – u.a. auch auf Grund von Abklärungen am Pizzo Cengalo nach dem ersten Grossereignis vom 27. Dezember 2011 (rund

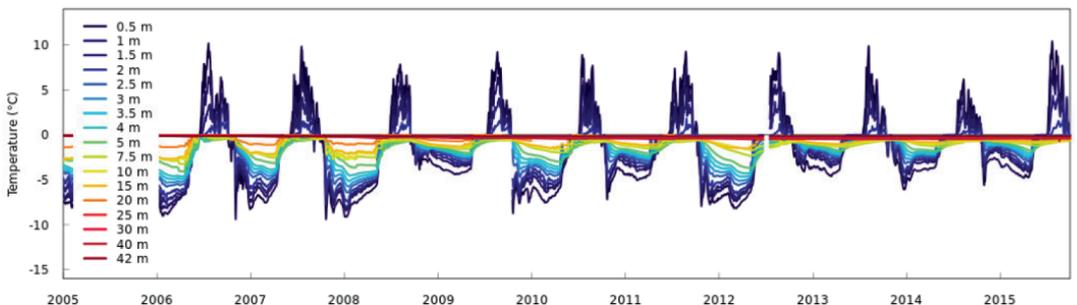


Fig. 1: Temperatureentwicklung im Permafrost. Erwärmung im Bohrloch Murtel-Corvatsch (Engadin) seit 2005 (Tiefen bis 42 m; Quelle: www.permos.ch).

1.5 Mio. m<sup>3</sup>) – davon aus, dass das Permafrosteis vor allem Gesteinsmassen bis zu einem Volumen von weniger als 100'000 m<sup>3</sup> zu stabilisieren vermag. Ein denkbarer Grund dafür ist, dass der Permafrost nicht genügend weit ins Berginnere reicht. Beim allfälligen Auftauen des Eises werden wahrscheinlich bedeutend geringere Kubaturen, als sie für Bergstürze gelten, destabilisiert. Der Einfluss des Rückganges des Permafrosts auf mögliche grössere Instabilitäten ist allerdings zurzeit noch wenig geklärt. Felsmechanisch sowie physikalisch nachvollziehbare Prozessbeschreibungen, welche die Plausibilität für einen massgebenden Destabilisierungsprozess des Permafrosts erläutern, fehlen bisher.

### 3.6 Zusammenwirken von Disposition und Prozessauslösung

Entscheidend für den «Reifegrad» eines instabilen Felsverbandes bis zur Auslösung des Bergsturzes ist somit der geologische Zeitraum der Schwächung bzw. der Entfestigung des Gebirges. Diese Entwicklung der Destabilisierung wurde von Popescu (2002) beschrieben und grafisch dargestellt (Fig. 2).

In diesem Bild entspricht – vereinfacht gesagt – der Sicherheitsfaktor (factor of safety) dem Verhältnis der rückhaltenden Kräfte zu den gravitativen (destabilisierenden) Kräften. Der Grad der Sicherheit eines bereits geschwächten Gebirgsverbandes wird im Laufe der Zeit, meist stufenweise, verringert, bis er den Wert 1.0 unterschreitet und es zum Versagen kommt. Zur Schwächung des Gebirges kann dabei ein einziger wesentlicher Faktor beitragen – z. B. ein Starkniederschlag oder ein Starkbeben – oder es ist auch mehr als ein Faktor möglich. Bei einem stark auf Kluft- bzw. Bergwasserdruck reagierenden Gebirgsverband wird nach jedem massgeblichen Wassereintrag eine mehr oder weniger grosse Verringerung des Sicherheitsgrades erfolgen. Ein ähnliches grafisches Bild der Deformation zeigte im Übrigen auch die messtechnisch überwachte Felswand bei Randa nach dem ersten Grossabbruch von 1991: Die Aufzeichnung der inversen Bewegungsgeschwindigkeit deutet auf eine stufenweise eintretende Schwächung des Gebirgsverbandes bis zum zweiten Abbruch hin (vgl. Fig. 3; Ischi et al. 1991).

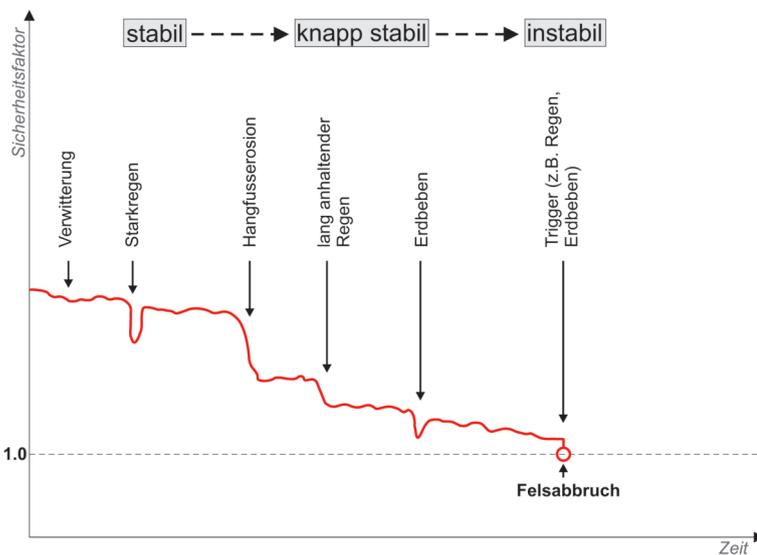


Fig. 2: Veränderung des Sicherheitsfaktors vs. Zeit in einem fiktiven Beispiel einer grossen Felsinstabilität (nach Popescu 2002).

### 3.7 Ursachen für den Bergsturz am Pizzo Cengalo

Am Pizzo Cengalo ist die geologische Grunddisposition für Bergstürze sehr ausgeprägt. Die geologisch-morphologische Geschichte führte dazu, dass im Bergeller Granit des Pizzo Cengalo zahlreiche Bruchzonen und Trennflächen entstanden sind, wodurch bereits früh der Grundstein für einen späteren Destabilisierungsprozess gelegt wurde. Durch die zusätzliche Einwirkung der jahrtausendlangen Verwitterungs- und Erosionsprozesse entstand allmählich ein stark «zerütteter» Berg. Von Interesse in diesem Zusammenhang ist, dass die tektonische Vorkonditionierung beim nur ca. 1 km westlich davon gelegenen, aus dem gleichen Bergeller Granit aufgebauten Pizzo Badile sehr verschieden ist: Auf Grund der eigenen geologischen Geschichte sind hier grössere Felsinstabilitäten offenbar kaum von Bedeu-

tung, d.h. der Berg ist vergleichsweise «gesund».

Betreffend Permafrostrückgang ist relevant, dass sowohl nach dem ersten Bergsturz Ende Dezember 2011 als auch in geringerem Ausmass im Jahr 2017 Eisvorkommen im Abbruchgebiet beobachtet wurden. Die oberflächennahen Felstemperaturen im schneefreien Permafrost des Pizzo Cengalo dürften ähnlich sein wie im Felslogger am Piz Corvatsch (Nordseite ca. 3200 m ü. M) und sich im Jahresmittel um die  $-2^{\circ}\text{C}$  bewegen. In den letzten 150 Jahren muss man generell von einer Erwärmung von 1.5 bis  $2.5^{\circ}\text{C}$  ausgehen. Dieses Klimasignal dürfte über reine Wärmeleitung (konduktiver Wärmefluss) schon relativ weit in den Fels eingedrungen sein (Noetzi & Gruber 2009). Neben der Wärmeleitung spielen im zerklüfteten Fels auch advective Wärmeflüsse eine Rolle, d. h. Klufwasservorgänge.

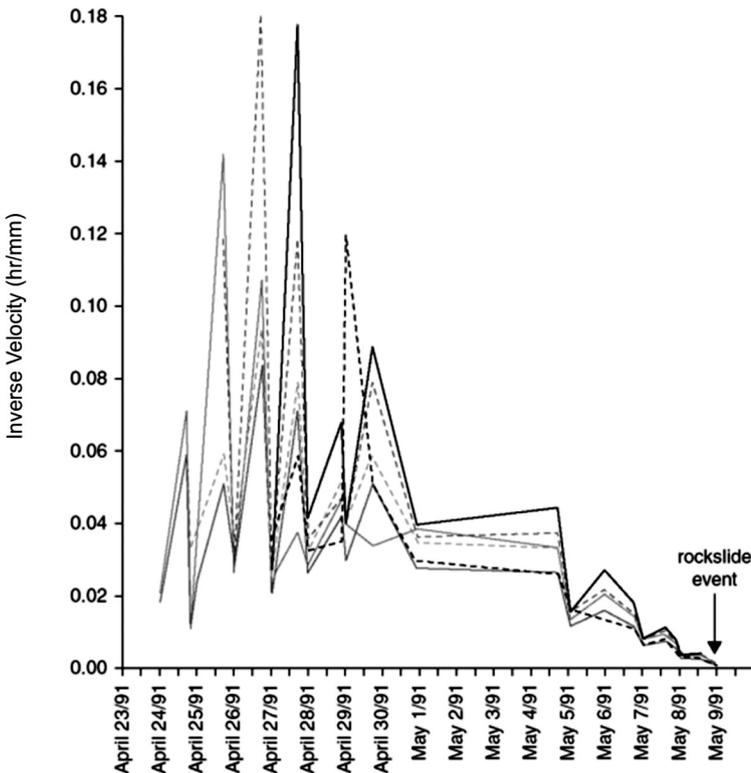


Fig. 3: Darstellung der inversen Geschwindigkeit bei der Felsüberwachung von Randa 1991 vor dem zweiten Felsabbruch (aus: Ischi et al. 1991).

Beim Beispiel des Pizzo Cengalo kann auf Grund der oben beschriebenen generellen Prozessentwicklung (Fig. 2) davon ausgegangen werden, dass dieser ohnehin «reif» zum Abbruch war. Ein erstes Anzeichen dieses erhöhten Reifgrades ist der grosse Felsabbruch von 1.5 Mio. m<sup>3</sup> im kalten Wintermonat Dezember 2011. Welche Faktoren am Pizzo Cengalo letztlich ausschlaggebend für den Abbruch im August 2017 waren, werden nachfolgende Untersuchungen zeigen. Denkbar ist gemäss einer Stellungnahme des Kantons Graubünden (AWN Graubünden 2017), dass der Kluftwasserdruck für die Auslösung eine massgebliche Rolle gespielt hat.

#### 4 Häufigkeit von Bergstürzen

Bei der Diskussion über den Bergsturz am Pizzo Cengalo vom August 2017 kam auch die Frage auf, ob Bergstürze in der Schweiz im Zuge der Klimaerwärmung häufiger werden.

Dazu soll ein Blick in die Geschichte geworfen werden: Zusammenstellungen von historisch dokumentierten Bergstürzen (>1 Mio. m<sup>3</sup>) sind in Heim (1932), Abele (1974) und Gruner (2006) zu finden. Allerdings sind hier in erster Linie Ereignisse mit Schadenfällen aufgeführt

sowie Bergstürze, welche in der Bevölkerung einen erhöhten Aufmerksamkeitsgrad erlangten. Grossereignisse aus den weit vom Siedlungsraum entfernten hochalpinen Gebieten und aus früheren Jahrhunderten sind sicher deutlich schlechter dokumentiert oder fehlen.

In der Schweiz sind aus den letzten 70 Jahren folgende Bergstürze bekannt (vgl. Tab. 1).

Die Aufzeichnungen dieser dokumentierten Ereignisse aus den letzten 70 Jahren lassen den Schluss zu, dass Bergstürze in der Schweiz selten vorkommen. Selten bedeutet hier, dass pro Dekade, d. h. alle zehn Jahre, mit ein bis zwei Bergstürzen zu rechnen ist.

Inwiefern solche Ereignisse bei einer weiter fortschreitenden Klimaerwärmung häufiger werden könnten, muss offen bleiben. Grundsätzlich ist diesbezüglich auf die Aussagen betreffend die geologische Disposition eines Gebirges (Kapitel 3) mit der meist sehr lang andauernden Schwächung des Felsverbandes hinzuweisen (vgl. auch Fig. 2). Eine Zusammenstellung der dokumentierten und datierten Bergstürze seit der letzten Eiszeit (Gruner 2006) zeigt vermehrte Ereignisse in der Phase der massgebenden Klimaänderung am Ende der letzten Eiszeit. Hingegen

1946	Rawilpass (VS)	ca. 4 bis 6 Mio. m <sup>3</sup>	Kalk
1954	Dom (VS)	ca. 1.5 Mio. m <sup>3</sup>	Kristallin
1991	Randa (VS) *	ca. 30 Mio. m <sup>3</sup>	Kristallin
1996	Sandalp (GL) **	ca. 2.2 Mio. m <sup>3</sup>	Kalk
2006	Dents de Morcles (VS)	ca. 1 Mio. m <sup>3</sup>	Kalk
2011	Pizzo Cengalo (GR)	ca. 1.5 Mio. m <sup>3</sup>	Kristallin
2017	Pizzo Cengalo (GR)	ca. 3 Mio. m <sup>3</sup>	Kristallin

\* 2 Ereignisse bis 20 Mio. m<sup>3</sup> bzw. bis 10 Mio. m<sup>3</sup>. Der Prozess fand jeweils in Form von mehreren Felsstürzen <1 Mio. m<sup>3</sup> statt, d. h. streng genommen waren dies keine Bergstürze.

\*\* 2 Ereignisse; das grössere hatte ein Volumen von ca. 1.75 Mio. m<sup>3</sup> (Ausbruch).

Tab. 1: Bergstürze aus den letzten 70 Jahren in der Schweiz.

lassen die Auswertungen im nachfolgenden Holozän keine signifikanten Zusammenhänge zwischen Warmzeiten und grossen Sturzeignissen erkennen.

## 5 Mögliche Prozessketten bei Bergstürzen

Bei Bergstürzen sind generell Prozessketten zu beachten: Von der Prozessauslösung (vgl. Kapitel 3.5) über den Sturzprozess mit allen möglichen Interaktionen entlang des Fliessweges bis zu den damit zusammenhängenden Auswirkungen im Ablagerungsgebiet. Dazu gehören auch der Aufstau von Flüssen und Flutwellen in Seegebieten. Was ist möglich in solchen Fällen, was ist denkbar, wie gross ist die Wahrscheinlichkeit des «Undenkbaren»?

Wir fokussieren hier anhand von einigen Beispielen aus der Schweiz und aus dem internationalen Raum auf solche Prozessketten nach der Auslösung von Bergstürzen.

Beispiele von direkten Umwandlungen von Bergstürzen in Murgänge sind selten. In der Literatur sind aus der Schweiz keine Beispiele bekannt. In Kanada kollabierte 2010 ein Teil des Mount Meager mit einem Volumen von ungefähr 48 Mio. m<sup>3</sup> und wandelte sich unmittelbar in einen aussergewöhnlich grossen Murgang um (Guthrie et al. 2012). Ein Teil des Abhanges war aufgrund der erheblichen Schnee- und Eisschmelze wassergesättigt; nach dem Ereignis konnten relevante Grundwasseraustritte aus der Abrissfläche beobachtet werden. Der Bergsturz wandelte sich in einen Murgang um, der eine Auslaufstrecke von 12.7 km aufwies. Teile des Murgangmaterials stauten den Lillooet River auf, was die Evakuierung von >1500 Einwohnern eines Dorfes flussabwärts erforderte. In den Jahrzehnten vor dem Ereignis waren dort einige kleinere Murgänge infolge von Rutschungen beobachtet worden. Der Bergsturz ist über einen Gletscher geflossen; die Rolle

des Gletscherschmelzprozesses wurde von Guthrie et al. (2012) jedoch nicht im Detail diskutiert.

2012 ereignete sich in Nepal an den Flanken des Annapurna IV ein Bergsturz mit einem geschätzten Volumen von mehr als 10 Mio. m<sup>3</sup>, welcher am Hangfuss grosse Mengen an Eis erodierte. Daraus entwickelte sich ein Murgang bzw. stark geschiebeführender Abfluss, welcher mit hoher Geschwindigkeit durch das Pokhara Valley strömte und mindestens 72 Menschenleben forderte (Hanisch et al. 2013). Ein ähnliches, jedoch kleineres Ereignis in Neuseeland wurde von Carey et al. (2015) beschrieben. Dabei floss ein Bergsturz mit einem Volumen von 4.5 – 5.5 Mio. m<sup>3</sup> von Mt. Evans über dessen Gletscher und erodierte erhebliche Mengen an Schnee und Eis. Die Bergsturzmasse nahm dabei Wasser sowie auch Geschiebe und Moränenmaterial auf und entwickelte sich zu einem Murgang, welcher weiter unten bewohnte Gebiete bedrohte. Anstatt Gletschereis kann auch Schnee die Mobilität der Bergstürze vergrössern. Beispiele von solchen Massenbewegungen mit weniger als 1 Mio. m<sup>3</sup> werden aus Japan beschrieben (Yamasaki 2014) oder sind vom Ereignis im Val Strem bei Sedrun bekannt.

Bedeutend häufiger sind Ereignisse, bei denen durch Rutsch- und Bergsturzmassen ein Aufstau von Flüssen erfolgt, mit nachfolgendem Dambruch. In Abhängigkeit von der Korngrössenzusammensetzung des Dammes und des Bruchprozesses kann der Ausbruch solcher Seen sehr grosse Überschwemmungen zur Folge haben (z.B. Buzza di Biasca in 1513/1515, Badoux et al. 2016.). Möglich sind auch grosse Murgänge mit mehreren Hunderttausend Kubikmetern wie beispielsweise im Illgraben bei Leuk nach einem Ausbruch eines Sees im Jahr 1961, welcher sich aufgrund eines grossen Felsausbruches von 3.5 Mio. m<sup>3</sup> gebildet hatte (Lichtenhahn 1971). Die Zeitspanne zwischen Bergsturz und Seeausbruch beträgt

für die hier beschriebenen Beispiele einige Monate (Illgraben) bis mehr als ein Jahr (Buzza die Biasca), was möglicherweise ausreichend wäre für das Ergreifen von Massnahmen zur Schadenverhinderung.

Schliesslich ist nach Bergstürzen auch mit einer Erhöhung der Aktivität von Murgängen zu rechnen. Frank et al. (in Vorbereitung) zeigen für einige Fälle in der Schweiz eine um eine Grössenordnung (im Vergleich zur Situation vor einem Bergsturz) erhöhte Murgangaktivität.

Im Weiteren sind auch Beispiele von Flutwellen eines Sees bzw. des Meeres aufgrund eines Grossabsturzes zu erwähnen. Bekannteste Beispiele sind die katastrophale Flutwelle im Lauerzersee nach dem Bergsturz von Goldau 1806 (Thuro et al. 2006) oder die Flutwelle im Vierwaldstättersee nach dem grossen Sturzereignis am Bürgenstock 1601 (Keller 2017). Bei einem gewaltigen Bergsturz an der Westküste von Grönland im Juni 2017 (ca. 54 Mio. m<sup>3</sup>) stürzte ein Grossteil der Felsmasse ins Meer, worauf sich eine Flutwelle entwickelte, welche kurz darauf ein 28 km südlich davon gelegenes Küstendorf erreichte und dort vier Menschenleben forderte sowie elf Gebäude zerstörte.

Zurück zur eingangs erwähnten Frage der Wahrscheinlichkeit des Udenkbaren: Das Ereignis am Pizzo Cengalo und die vorhergehende Zusammenstellung aus verschiedenen Einzelfällen aus der ganzen Welt zeigen, dass es das «Udenkbare» gibt – in verschiedenen Varianten und in verschiedenem Ausmass. Wie mit der Wahrscheinlichkeit umgegangen werden soll, wird im nachfolgenden Kapitel näher beleuchtet.

## **6 Umgang mit der Bergsturzproblematik**

Bergstürze sind zwar weitaus seltener als Steinschlag und Felssturz, doch sie haben

grosse Auswirkungen. Deshalb müssen die möglichen Szenarien eines Bergsturzes bei der Gefahrenbeurteilung berücksichtigt werden. Dies gilt auch für Prozessketten, wie sie im vorhergehenden Kapitel beschrieben worden sind. In hochalpinen, glazialen und periglazialen Gebieten sind z. B. lange Sturzbahnen, Gerölllawinen mit Schnee oder Eis vermischt und nachfolgende Murgänge zu erwarten. Der Anteil an Schnee in gemischten Lawinen (Stein-Schnee plus evtl. Wasser) ist naturbedingt im Winter und Frühling grösser. Demgegenüber sind die Auswirkungen des Gletscherrückgangs und des schmelzenden Permafrosts im Sommer und im Herbst grösser. Über die letzten Jahrzehnte hat sich im Zuge der Klimaerwärmung gezeigt, dass solche Veränderungen im Vergleich zu früher zunehmen. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Gefahrensituation räumlich und zeitlich variabel ist. Als Folge dieser klimatisch bedingten Veränderungen ist diesen Prozessen deshalb die nötige Aufmerksamkeit zu schenken.

Um eine Entwicklung von einem «ungefährlichen» Berg zu einem Gefahrengebiet mit einer erhöhten Eintretenswahrscheinlichkeit zu erkennen, sind Aufmerksamkeit und sorgfältige Beobachtungen von potenziellen Bergsturzgebieten angesagt. Eine detailliertere und systematischere Erkundung von potenziellen Bergsturz-Gefahrengebieten im Schweizer Alpenraum kann – soweit diese nicht bereits bekannt sind – grundsätzlich durchaus Sinn machen. So ist z. B. denkbar, dass man bei der Beurteilung eines solchen Gefahrengebietes zum Schluss kommt, dass für einen Bergsturz nur eine sehr geringe Eintretenswahrscheinlichkeit (<300-jährlich), d.h. eine Restgefährdung im Sinne eines Gefahrenhinweises besteht.

Aufmerksamkeit und Beobachtung bedeuten, mit dem heutigen Wissen und den technischen Möglichkeiten in diesen Gefahrengebieten entsprechende Messüberwachungen dort zu realisieren sind, wo dies als sinnvoll

bzw. als notwendig erachtet wird (Schadenpotential!). Diese Arbeiten sind geologisch zu begleiten. Aus der Sicht der AGN ist es wichtig, mögliche riskante Gefahrengebiete rechtzeitig zu erfassen und zu überwachen (vgl. Bericht «Frühwarnung und Monitoring» in diesem Heft). Es dient der Sache jedoch nicht, ohne detaillierte Kenntnisse einer Gefahrensituation eine Katastrophen-Alarmstimmung heraufzubeschwören.

Auch wenn Bergstürze in der Schweiz als sehr seltene Ereignisse zu betrachten sind, ist die in der Vollzugshilfe (BAFU 2016) festgehaltene Maxime der Früherkennung von sich akzentuierenden Gefahrensituationen auch für mögliche Bergstürze wichtig. Durch eine frühzeitige Überwachung kann zudem die Entwicklung in einem potenziellen Gefahrengebiet besser verstanden werden. Damit können allfällig notwendige Massnahmen bei Bedarf gezielt und stufengerecht eingeleitet werden.

## Literatur

- Abele, G. 1974: Bergstürze in den Alpen. Wissenschaftliches Alpenvereinsheft, 25, 1-230.
- AWN Graubünden [2017]: Kurzbericht der Expertengruppe zu den Ereignissen Cengalo/Bondo für die Medienkonferenz vom 15.12.2017.
- Badoux, A., Andres, N., Techel, F. & Hegg, Ch. 2016: Natural hazard fatalities in Switzerland from 1946 to 2015. *Nature Hazards and Earth System Sciences*, 16, 2747-2768.
- BAFU 2016: Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt. Umwelt-Vollzug Nr. 1608.
- Bollinger, D. 2006: Der Bergsturz von Goldau 1806: Rückblick und Ausblick. *Bulletin für angewandte Geologie*, 11/2, 3-12.
- Bussmann, F. & Anselmetti F. 2010: Rossberg landslide history and flood chronology as recorded in Lake Lauerz sediments (Central Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences*, 103, 43-59.
- Carey, J.M., Hancox, G.T., & McSaveney, M.J. 2015: The January 2013 Wanganui River debris flood resulting from a large rock avalanche from Mt. Evans, Westland, New Zealand. *Landslides*, 12, 961-972.
- Evans, S.G., Scarascia Mugnozza, G., Strom, A.L., Hermanns, R.L., Ischuk, A., & Vinnichenko, S. 2006: Landslides from massive rock slope failure and associated phenomena. In: Evans, S.G., Scarascia Mugnozza, G. & Strom, A.L. (eds.). *Landslides from massive rock slope failure*. NATO SCI S IV Ear En 49, Springer Netherlands, 3-52.
- Frank, F., Huggel, Ch., McArdell, B.W. & Vietl, A. 2018 (in Vorbereitung): Sediment input and debris-flow activity: a systematic comparison of five catchments in Switzerland. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Gander, P. 2007: Altersbestimmung des Bergsturzes von Balm, Meiringen BE - Radiokarbon-Datierung an Holzproben und Bestimmung von aktuellen Sedimentationsraten. *Bulletin für angewandte Geologie*, 12/2, 63-71.
- Gruner, U. 2006: Bergstürze und Klima in den Alpen – gibt es Zusammenhänge? *Bulletin für angewandte Geologie*, 11/2, 25-34.
- Gruner, U. 2008: Klimatische und meteorologische Einflüsse auf Sturzprozesse. *Proceed. Conf. Interprävent 2008/2*, 147-158.
- Guthrie, R.H., Friele, P., Roberts, N., Evans, S.G., Delaney, K.B., Roche, D., Clague, J.J. & Jakob, M. 2012: The 6 August 2010 Mount Meager rock slide-debris flow, Coast Mountains, British Columbia: characteristics, dynamics, and implications for hazard and risk assessment. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 12, 1277-1294.
- Hanisch, J., Koirala, A. & Bhandary, N.P. 2013: The Pokhara May 5th flood disaster: A last warning sign sent by nature? *Journal Nepal Geological Society*, 46, 1-10.
- Heim, A. 1932: Bergsturz und Menschenleben. *Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft Zürich*, 1-218.
- Hungr, O., Leroueil, S. & Picarelli, L. 2014: The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11/2, 167-194.
- Ischi, H., Keusen, H.R. & Scheller, E. 1991: Bergsturz Grossgufer vom April/Mai 1991. Zusammenfassender Bericht über die Aktivität der Geotest AG. Unpubl. Bericht vom 19.12.1991.
- Keller, B. 2017: Massive rock slope failure in Central Switzerland: history, geologic-geomorphological predisposition, types and triggers, and resulting risks. *Landslides*, 14, 1633-1653.

- Kenner, R. & Philipps, M. 2017: Fels- und Bergstürze in Permafrost Gebieten: Einflussfaktoren, Auslösemechanismen und Schlussfolgerungen für die Praxis. Schlussbericht Arge Alp Projekt. 17. Juni 2017.
- Keusen, H. R., Bollinger, D., Lateltin, O. & Beer, Ch. 1998: Massenbewegungen und ihre geologische Beurteilung. Bulletin für angewandte Geologie, 3/1, 11-28.
- Keusen, H.R. 1998: Die Bergstürze auf der Sandalp 1996 – Risikobeurteilung und Gefahrenmanagement. Bulletin für angewandte Geologie, 3/1, 89-102.
- Lichtenhahn, C. 1971: Zwei Betonmauern: Die Geschieberückhaltesperre am Illgraben (Wallis) und die Staumauer des Hochwasserschutzbeckens an der Orlegna im Bergell (Graubünden). International Symposium Interpraevent (Villach, Kärnten, Österreich), 1971, 451–463.
- Noetzli, J. & Gruber, S. 2009: Transient thermal effects in Alpine permafrost. The Cryosphere, 3, 85-99.
- PLANAT - Nationale Plattform Naturgefahren 2018: [www.planat.ch/Wissen](http://www.planat.ch/Wissen).
- Popescu, M. 2002: Landslides causal factors and landslide remedial options. Proceedings 3rd International Conference on Landslides, Slope Stability and Safety of Infrastructure 2002, 1-21.
- Thuro, K., Berner, Ch. & Eberhard, E. 2006: Der Bergsturz von Goldau – Was wissen wir 200 Jahren nach der Katastrophe? Bulletin für angewandte Geologie, 11/2, 13-24.
- Scheidegger, A.E. 1973: On the prediction of the reach and velocity of catastrophic land-slides. Rock Mechanics, 5, 231-236.
- Schindler, C., Cuénod, Y., Eisenlohr, Th. & Joris, Ch.-L. 1993: Die Ereignisse vom 18. April und 9. Mai 1991 bei Randa (VS) – ein atypischer Bergsturz in Raten. Eclogae Geologicae Helvetiae, 86/3, 643-665.
- Yamasaki, S., Nagata, H. & Kawaguchi, T. 2014: Long-traveling landslides in deep snow conditions induced by the 2011 Nagano prefecture earthquake, Japan. Landslides 11, 605-613.