Prozesse die zu grossen Fels- und zu Bergsturz führen

Autor(en): **Krähenbühl, Ruedi / Nänni, Christoph / Donau, Florian**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology**

Band (Jahr): **23 (2018)**

Heft 1

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-832391

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Swiss Bull. angew. Geol. Vol. 23/1, 2018 S. 29-56

Prozesse die zu grossem Fels- und zu Bergsturz führen

Ruedi Krähenbühl[1], Christoph Nänni[2], Florian Donau[1]

Stichworte: Felssturz, Ursachen, Entfestigungsprozesse, Gefahrenerkennung, Gefahrenbeurteilung, Ereignisvorhersage, Gefahrenmanagement

Zusammenfassung

Nach jahrzehntelangen, intensiven Erfahrungen im Bereich von Sturzprozessen in den verschiedensten Funktionen liegt nachstehend eine Auslegeordnung vor, welche den ganzen Bogen über das Thema Felssturz spannt, von den Ursachen, der Erkennung, der Abklärung, der Beurteilung, der Massnahmenwahl, der Vorhersage und des Gefahrenmanagements. Anhand von Praxisbeispielen werden ausgewählte Themen vertieft ausgeleuchtet. In unserer dicht genutzten Landschaft steigt der Druck auf eine wirkungsvolle Gefahrenprävention. Bei grossen Sturzprozessen muss es darum gehen, Gefahren konkret und wirklichkeitsnah zu erkennen, um vor einem Ereignis gezielt die geeigneten Rückzugs- und Schutzvorkehrungen vornehmen zu können. Neben dem Schutz von Personen muss der meist immense, materielle Schaden begrenzt werden können.

Das stellt hohe Anforderungen an den in der Pflicht stehenden Fachmann, den Geologen. Die Praxis zeigt, dass wenn auch jedes Sturzpotential naturbedingt einem Unikat gleichkommt, es trotzdem Muster und Vorgehensweisen gibt, welche die Chance auf einen «kontrollierten Bogenverlauf» von der Sturzdispositionserkennung bis zum Sturzereignis wesentlich zu erhöhen vermag. Die Vergegenwärtigung des Prozessverständnisses für «Sturz», das Erkennen der massgebenden Felsentfestigungsprozesse, was erst gezielte, geologische Abklärungen ermöglicht, die als Grundlage für eine wirklichkeitsnahe Gefahrenbeurteilung unabdingbar sind, bilden das Fundament dieses Vorhabens. Die wirklichkeitsnahe Gefahrenbeurteilung ermöglicht in Hinblick auf ein grosses Sturzereignis die effiziente Wahl der vorbereitenden Schutzmassnahmen, begünstig die präzise Ereignisvorhersage und erleichtert das integrale Risikomanagement. Damit kann der unaufhaltsame Schaden wesentlich reduziert werden. Hier sind die Geologen gefordert.

Die wesentlichen Aspekte der vorliegenden Analyse und Auslegeordnung sind, dass nach dem Erkennen einer Felssturzdisposition gezielte messtechnische Abklärungen und Überwachungen nur dann möglich sind, wenn vorgängig eine detaillierte, geologische, felsmechanische und kinematische Entfestigungs-, Prozess- und Ursachenanalyse erarbeitet wurde. Detaillierte, geologische Feldaufnahmen bilden dabei die Basis und sind unabdingbar. Felssturzdispositionen lassen sich generell in drei verschiedene Typen von unterschiedlich dominierten Prozessen, wie Gleiten, Kippen/Gleiten und Kippen unterteilen. Der Typ «Kippen/Gleiten» ist am schwierigsten zu erfassen und ist für das Erstellen von Sturzprognosen äusserst anspruchsvoll. Er kann heute die grössten Sturzvolumina generieren und überraschend bei geringen Verschiebungen und Verschiebungsgeschwindigkeiten eintreten. Seine Entfestigung und Sturzvorbereitung wird primär von gravitativ gesteuerten, felsmechanischen Prozessen bestimmt. In der Praxis wird das Augenmerk fälschlicherweise oft zu sehr auf die Auslöseprozesse gesetzt (Trigger). Diese treten erst in der Endphase einer Entfestigung auf, es braucht sie aber nicht zwingend. Der gezielte Einsatz einer heute fortgeschrittenen Messtechnik erlaubt es nicht nur eine Sturzdisposition zu erkennen, sondern auch zu beurteilen, ob sie sich in einem unkritischen Anfangsstadium oder bereits im Bereich eines kritischen Endzustands befindet. Dies ermöglicht die Vorhersage von Sturzereignissen, für die stets ein dreistufiger Vertrauensbereich angegeben werden soll. Da bei seltenen Ereignissen wie grosser Fels- und Bergsturz zwangsläufig nur wenig Geologen über eigene Erfahrungen verfügen können, ist bei Dispositionen mit sehr grossem Gefahren- oder sehr hohem Schadenpotential dem bearbeitenden Geologen ein Expertenteam, welches über solche Erfahrungen verfügt, zur Seite zu stellen.

[1] BauGrundRisk GmbH, Sennensteinstr. 5, 7000 Chur
[2] Tiefbauamt Graubünden, Leiter Geologie, Abteilung Kunstbauten, Sägenstr. 78, 7000 Chur

Abstract
Based on over two decades of practical experience managing rockslide processes, we provide an overview of the entire chain of rockslide hazard management. We discuss with illustrated examples, the potential causes of rock-mass softening, the identification, investigation and assessment of rockslide hazard, and finally to the prediction of rockslide events. The understanding of the rock-mass softening processes and its verification in the field demands specific geological and metrological investigations which are fundamental to rockslide hazard assessment. Developing a robust hazard assessment for rockslides is essential in selecting the primary protection measures applied. It is only with detailed understanding and documentation of rockslide processes that it is possible to provide precise failure prediction. Event prediction becomes increasingly important in managing rockslide hazards to ensure protection for society against both financial and physical damages. Respectively this places increasing demand on the responsibilities of operating geologists to provide precise failure prediction. Although every rockslide predisposition is unique in nature, there are certain patterns and methods of identifying the progression of a rockslide towards failure.

The principal understanding of a rockslide is obtained from field work. Following the detection of a rockslide predisposition, an effective and efficient monitoring campaign is only possible if preliminary detailed field analysis have been carried out. Essential are a sound understanding of the geological, rock mechanical and kinematic destabilisation processes. Rockslide predispositions can be divided into three types of processes, based on «sliding», «toppling/sliding» and «toppling». The type «toppling/sliding» is recognized as the most complex and therefore difficult to analyse. Respectively these can generate the largest rockslide volumes. Examples are Randa 1991 and Piz Cengalo 2017. The progression of a rockslide from rock softening through to its failure is mainly controlled by gravitational and rock-mechanical processes. Targeted rock-mass monitoring enables the kinematics and the stage of softening, determining whether the rock-mass is in a non-critical start phase or a critical end-phase close to failure. With this approach, the chances of predicting the failure event increase and it is recommended this methodology of reporting is employed to ensure increased reliability of failure prediction. It is seldom the case that a geologist will have had the chance to gain direct experience of managing large rockslide failure. In this regard, it is recommended that the leading geologist will be supported by an expert team comprised of specialists who have direct experience in managing rockslides.

1 Ausgangslage

Prozesse die zu Fels- und Bergsturz führen werden in Fachkreisen und nach Sturzereignissen in der Öffentlichkeit kontrovers diskutiert. Das in den Alpen sehr seltene Bergsturzereignis von Bondo hat dies exemplarisch vor Augen geführt. Dies weniger, weil die Ursachen, die zu Sturzereignissen führen im Grundsatz nicht bekannt wären. Wie üblich sind es Details, die für Verwirrung sorgen, das Wesentliche verschleiern und uns oft in eine falsche Richtung leiten. Im Zuge der immer intensiver geführten Klimadebatte werden von den Medien einzelne Prozesse, wie beispielsweise Permafrost als Ursache von Fels- und Bergsturz, gerne ins Feld geführt. Dies nicht zuletzt, um der Klimadebatte zusätzliches Gewicht zu verleihen. Tatsächlich hat jedoch Permafrost mit der Entstehung von grossem Felssturz und von Bergstutz nichts zu tun [1]. Es waren nicht die Medien sondern Fachleute, welche dieses Thema initial in die Diskussion einbrachten.

Sturzprozesse von grossem Volumen ereignen sich innerhalb des Naturgefahrenspektrums, wie Hochwasser, Stürme, Erdbeben, Feuer, etc., sehr selten. Sie machen weltweit weniger als 5% aller naturbedingten Schadenereignisse aus. Anderseits ist in unserem Alpenraum die öffentliche Sensibilität für gravitative Sturzereignisse in den letzten Jahren gestiegen. Dies wirkt sich bei den Verantwortlichen von Behörden und Verwaltung sowie von grossen Werkeigentümern auf den Umgang mit Sturzprozessen dahingehend aus, dass erhebliche Unsicherheiten entstehen, welche Abklärungen vorgenommen werden müssen und welche Massnahmen zweckmässig oder notwendig sind, um ein Sturzrisiko zu reduzieren (geologische Untersuchungen, messtechnische Überwachung, Alarmorganisation, bauliche Massnahmen, etc.).

Zwar gibt es heute viele, generelle Methodik- und Strategien-Grundlagen, Richtlinien, Emp-

fehlungen, Vollzugshilfen, Praxishilfen, etc. verschiedenster Behörden und Organisationen, die den Umgang mit Massenbewegungen regeln und erleichtern sollen (BAFU, BABS, ASTRA, WSL, SLF, Planat, FAN etc.). Im Rahmen des integralen Risikomanagements beleuchten diese primär den theoretischen, organisatorischen und planerischen Teil des Umgangs mit gravitativen Sturzprozessen. Den fachspezifischen, geologischen und praktischen Teil bei dem es um konkrete Sturzgefährdungen geht, ist wenig behandelt.

Jedes vorgefundene Sturzpotenzial stellt aufgrund seiner geologischen, räumlichen und kinematischen Disposition ein Unikat dar. Der praktische Umgang im Detail ist daher schwierig und muss von den Geologen, und den behördlichen Verantwortlichen individuell angegangen werden. Anderseits verlangt der heutige Zeitgeist auch bei schwierigen, oft schlecht fassbaren Problemstellungen zunehmend ein effizientes, zielgerichtetes und möglichst Kosten/Nutzen optimiertes Vorgehen.

Dieser Artikel soll das ganze Spektrum grosser Sturzprozesse, von den ursächlichen Einwirkungen, der Erkennung und Abklärung von Sturzgefährdungen, deren Beurteilung, dem Einleiten von Massnahmen, bis hin zur Fragestellung der Vorhersage von Ereignissen und des Gefahrenmanagements, aus geologischer, fachtechnischer Sicht ausleuchten. Sensible und/oder weniger geläufige Themen dieses Spektrums werden mit Fallbeispielen hinterlegt. Die an unzähligen Objekten gemachten Erfahrungen und Erkenntnisse sollen der Fachwelt und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

2 Ursache von Sturzprozessen

2.1 Übersicht Einwirkungen

In der Tabelle 1 sind die verschiedenen Einwirkungen, die den Felsen entfestigen und Sturzprozesse verursachen in einer Übersicht aufgeführt, inklusive deren Auswirkung, der generellen Ereignishäufigkeit und der Potenzialgrösse für einen allfälligen Schaden.

Für Felssturzprozesse sind die Einwirkungen 2.2-2.4 massgebend. Diese Prozesse bewirken, dass ein infolge Erosion überhöhte Felsformation über Jahrhunderte kontinuierlich entfestigt wird, bis sie schliesslich zum Absturz gelangt. Kurz vor dem Absturz können Triggereffekte, wie Starkniederschläge, Abschmelzen von Schnee, Erdbeben, etc. (2.5), den Zeitpunkt des Absturzes verkürzen oder bestimmen.

Bei den Auswirkungen auf das Felssturzvolumen lassen sich keine klaren Grenzen ziehen, da dieses je nach den geologischen und räumlichen Verhältnissen stark variieren kann. Generell ist bei kleinen Felsstürzen von einem Volumen von 100 m^3 bis wenige tausend m^3 auszugehen.

Typ	Einwirkung	Auswirkung	Häufigkeit	Potenzial *)
2.1a	Frost-Tauwechsel	Steinschlag, Blocksturz	häufig	bescheiden
2.1b	Auftauender Permafrost	Steinschlag, Blocksturz	langfristig	gering
2.2	Jahrestemperaturwechsel	Blocksturz, kleiner Felssturz	selten	erheblich
2.3	Kluftwasserdruck	Blocksturz, kleiner Felssturz	selten	erheblich
2.4	Gravitation (Schwerkraft)	Felssturz, Bergsturz *)	sehr selten	gross
2.5	Weitere (Trigger)	Felssturz, Bergsturz	sehr selten	gross

*) Beurteilungsskala Potenzial; bescheiden: kleines Schadenpotenzial mit häufigem Auftreten; gering: Potenzial wie «bescheiden» aber begrenzt auftretend; *) betrifft auch Steinschlag und Blocksturz.

Tab. 1: Einwirkungen auf den Fels und Auswirkungen auf die Sturzprozesse.

2.2 Temperatureinfluss

Der von den Jahrestemperaturschwankungen abhängige Einfluss auf die Felsentfestigung steht am Anfang des Entfestigungsprozesses und wurde insbesondere in spröden, kristallinen und metamorphen Gesteinen eingehend untersucht. Er kann bei einer entsprechenden Instrumentierung des Felsens mitverfolgt werden (Fig. 1).

Mit der im Herbst abnehmenden Temperatur zieht sich der Fels entsprechend seines Ausdehnungskoeffizienten zusammen. Durch die Kontraktion reisst das Gestein da, wo es schon gerissen ist, nämlich primär entlang der Felstrennflächen. Die steil stehenden Klüfte werden in die Tiefe des Gesteins weiter geöffnet, was in exponierten Lagen von Felswänden zu Verschiebungen im Felsen führt. Steigen die Temperaturen im Frühjahr wieder an, setzt mit der Ausdehnung des Gesteins der umgekehrte Prozess ein. Die geringe, entstandene Kluftöffnung wird im untersten Kluftbereich wieder geschlossen. Dies kann vollständig oder nur teilweise geschehen. Letzteres führt zu bleibenden Verschiebungen.

Dieser Prozess erfasst die Gesteine im oberflächennahen, vom Temperaturwechsel beeinflussten Felsbereich. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Wirksamkeit dieses Prozesses im Gestein ab, wie stark bleibt weiterhin Gegenstand von Untersuchungen. Im Val d'Infern [2] konnte dieser Temperatureinfluss bis in eine Tiefe von 10 m und in Randa bis in eine von ~ 80 m messtechnisch nach-

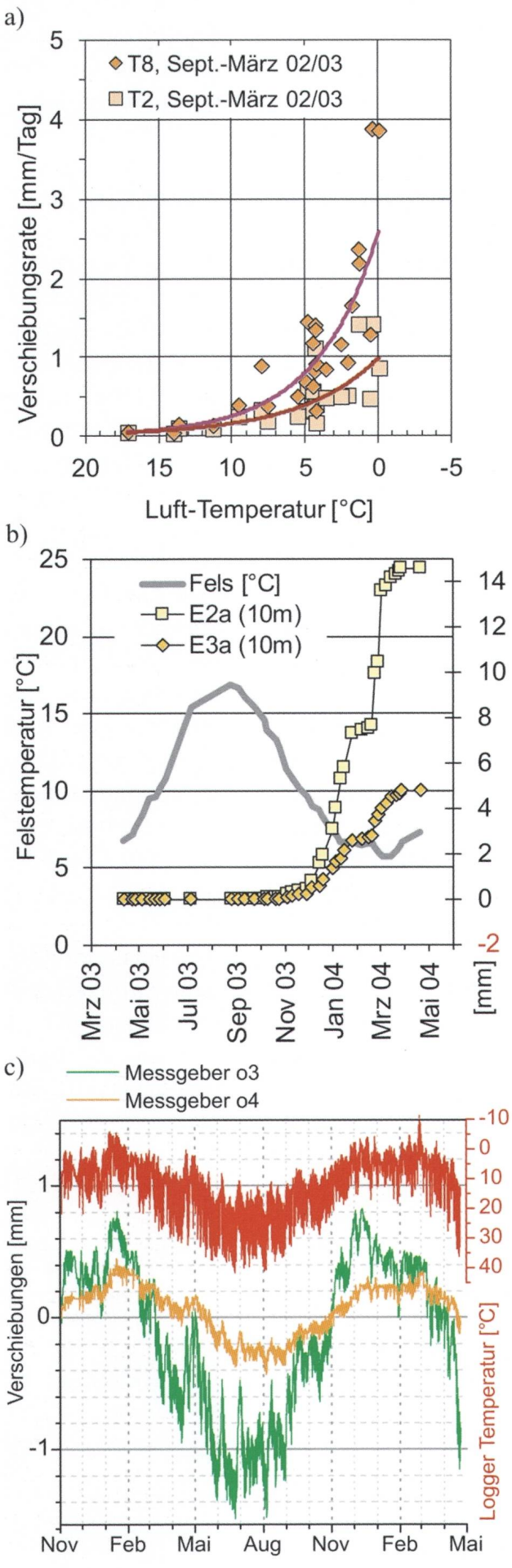


Fig. 1: Mit der ab Herbst sinkenden Temperatur können bei a) oberflächlich versetzten Jointmetern T und bei b) in Bohrlöchern versetzten Extensometern E, zunehmende Verschiebungen gemessen werden (Daten von Perioden ohne Niederschläge, Val d'Infern [2]). c) Temperaturabhängige, ausschliesslich elastische Jahresdeformationen oberflächlich versetzter Jointmeter einer Felsnase von > 1'000 m³ Volumen bei Buseno [28].

gewiesen werden [3]. Auf eine 20 m hohe und 20 m breite Felswand kann damit beispielsweise eine Felsmasse von einigen tausend m³ beeinflusst werden (Volumen von kleinem Felssturz).

Die jährlichen Lufttemperaturschwankungen vermögen die Felstemperatur des intakten Gesteins nur in den obersten Metern zu beeinflussen. Im Zusammenhang der bis in Tiefen von 80 m u.T. festgestellten, von saisonalen Temperaturschwankungen abhängigen Felsverschiebungen werden Effekte, wie konvektive Luftströme in Felstrennflächen, konduktiver und diffusiver Wärmetransport [3, 4], durch Temperaturschwankungen in die Tiefe übertragene, thermoelastische Dehnung, die kleinräumige Gleitprozesse anregen, etc. diskutiert [3].

In den aus spröden Kalken sowie Sandkalken und plastisch verformbaren Phylliten in Wechsellagerungen aufgebauten, sich als Gesteinsformation duktil verhaltenden Bündnerschiefer konnte dieser Temperatureffekt messtechnisch bisher nicht eindeutig oder nur vereinzelt nachgewiesen werden (Fig. 2; [33]).

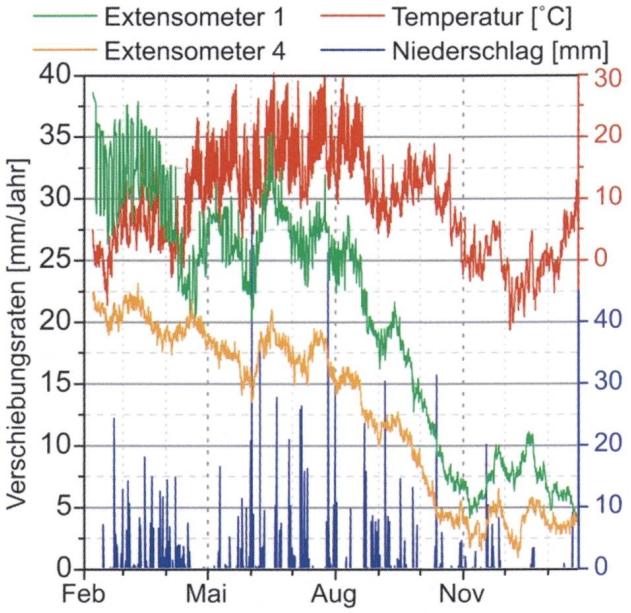


Fig. 2: Extensometerverschiebungen in duktil sich verhaltendem Bündnerschiefer lassen keine eindeutigen Abhängigkeiten von Temperatur und Niederschlag erkennen, Ricaldei, Tschiertschenstrasse (nach Kopfentlastung mittels Felsabtrag sind die Verschiebungen seit 2001 generell abnehmend [5]).

2.3 Einwirkung von Kluftwasserdruck

Tritt in der kalten Jahreszeit, wo die Klüfte temperaturbedingt ihre maximale Tiefe erreichen Regen ein, so wird in den Klüften der maximale, hydrostatische Wasserdruck erreicht. Dies kann die Verschiebungsgeschwindigkeiten gegenüber jenen des reinen Temperatureinflusses um den Faktor 2 bis 10 erhöhen (Fig. 3, 4). In exponierten Lagen öffnen sich die Klüfte dadurch irreversibel weiter, was bleibende Verschiebungen bewirkt [2]. Anderseits hat sich gezeigt, dass vergleichbare Niederschlagsmengen im Sommer, wo durch das temperaturbedingte, elastische Verengen der Klüfte die maximalen und damit kritischen, hydrostatischen Kluftwasserdrucke nicht mehr erreicht werden, auch keine nennenswerte Verschiebungsschübe mehr ausgelöst werden (Fig. 3b).

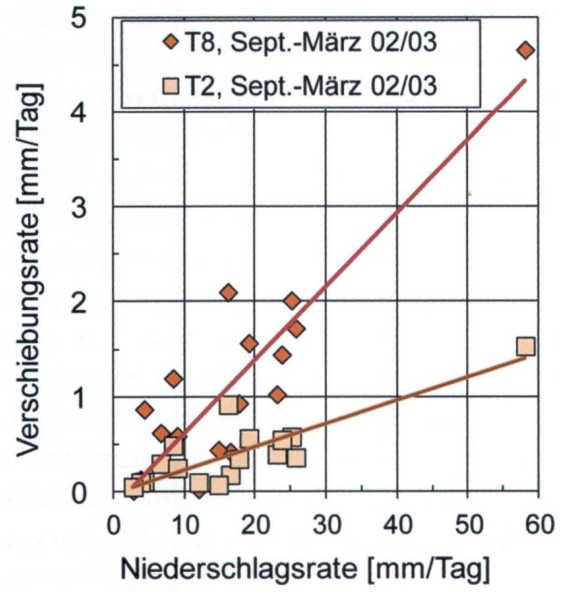
In der Praxis kann messtechnisch zwischen dem entfestigenden Einfluss des Temperaturwechsels und des Kluftwasserdrucks nicht immer eindeutig unterschieden werden. In unseren Breitengraden gehen Niederschläge insbesondere im Herbst meist mit einem deutlichen Temperaturabfall einher, womit sich beide Prozesse überlagern. Das Abschmelzen von frischem Schnee im Frühjahr kann als Trigger von Felssturz beobachtet werden (Einwirkung 2.5, Fig. 4). Die kontinuierlich ablaufende Schneeschmelze im Frühjahr wurde gelegentlich als kritische Kluftwassererhöhung festgestellt, die Bewegungsschübe auszulösen vermochte (Fig. 9b).

Dieser in spröd sich verhaltenden Felsformationen festgestellte, kombinierte elastisch-plastische Einfluss des Jahrestemperaturwechsels und der Kluftwasserdruckeinwirkungen bewirkt über die Jahrhunderte einen anhaltenden, dynamischen Entfestigungsprozess [2].

2.4 Einwirkung gravitativer Kräfte

Die durch die glaziale und in geringerem Masse durch die fluviatile Tiefenerosion geschaffene Geländevertiefung führte dazu, dass gravitative Kräfte auf überhöhte, steile und exponierte Felswände oder auf ganze Talflanken stark einwirken. Die geringsten Widerstände hat das Gestein felsmechanisch auf Zug (ca. 1/10 der Druckfestigkeit). In Felsformationen werden diese Widerstände durch tektonisch oder neotektonisch angelegte Felstrennflächen stark reduziert. Je nach den lithologischen Verhältnissen und der Felstrennflächendisposition können die Widerstände gegen gravitative Zugbeanspruchung bescheiden ausfallen, was Sturzereignisse begünstig.

a)



b)

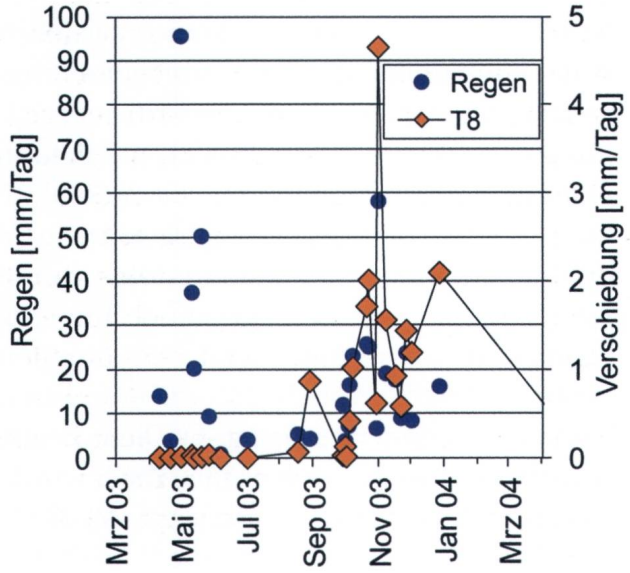


Fig. 3: a) Abhängigkeit der Verschiebungen oberflächlich versetzter Jointmeter T vom Niederschlag (Regressionsgeraden); b) In der kalten Jahreszeit, wo in den infolge des Temperaturrückgangs am stärksten geöffneten Klüften ein kritischer Kluftwasserdruck aufgebaut werden kann, vermögen Niederschläge Verschiebungsschübe auszulösen. Gleiche und höhere Niederschlagsmengen bleiben im Sommer dagegen wirkungslos (Daten von Niederschlagsperioden mit ± unveränderter, mittlerer 24 h-Temperatur, Val d'Infern [2]).

In unseren Nachbarländern kennt man den Begriff «Talzuschub», wo ganze Talflanken talwärts kriechen. Bei uns ist der Begriff wenig geläufig. Das in definierten Mustern Aufreissen von Spalten entlang von Talflanken, beispielsweise in kristallinen Gesteinsformationen ist vielerorts bekannt (Cuolm da Vi [7], Val Calanca [8], [9], [27]). Dies führt zu ausgedehnten, über Jahrtausende bis Jahrhunderte langsam ablaufende Massenbewegungen, die sich durch Grabenbildungen, Felssackungen, Verkippungen (Toppling) und Felsrutschungen manifestieren können. Alle diese verschiedenen Massenbewegungsphänomene können lokal von Sturzprozessen begleitet sein oder zu solchen führen [10, 12].

In überhöhten, exponierten Felsformationen bewirken die gravitativen Zugkräfte auf die gesamte Masse des Gebirges die grössten Spannungen. Verglichen zu den um Potenzen geringeren Spannungen, die von zyklischen Temperatur- und von nur entlang von Trennflächen einwirkendem Kluftwasserdruckwechsel ausgehen, wirken die gravitativen Zugkräfte permanent.

2.5 Weitere Einwirkungen (Trigger)

Erdbeben können stark entfestigte Sturzdispositionen als auslösenden Trigger zum Absturz bringen [31].

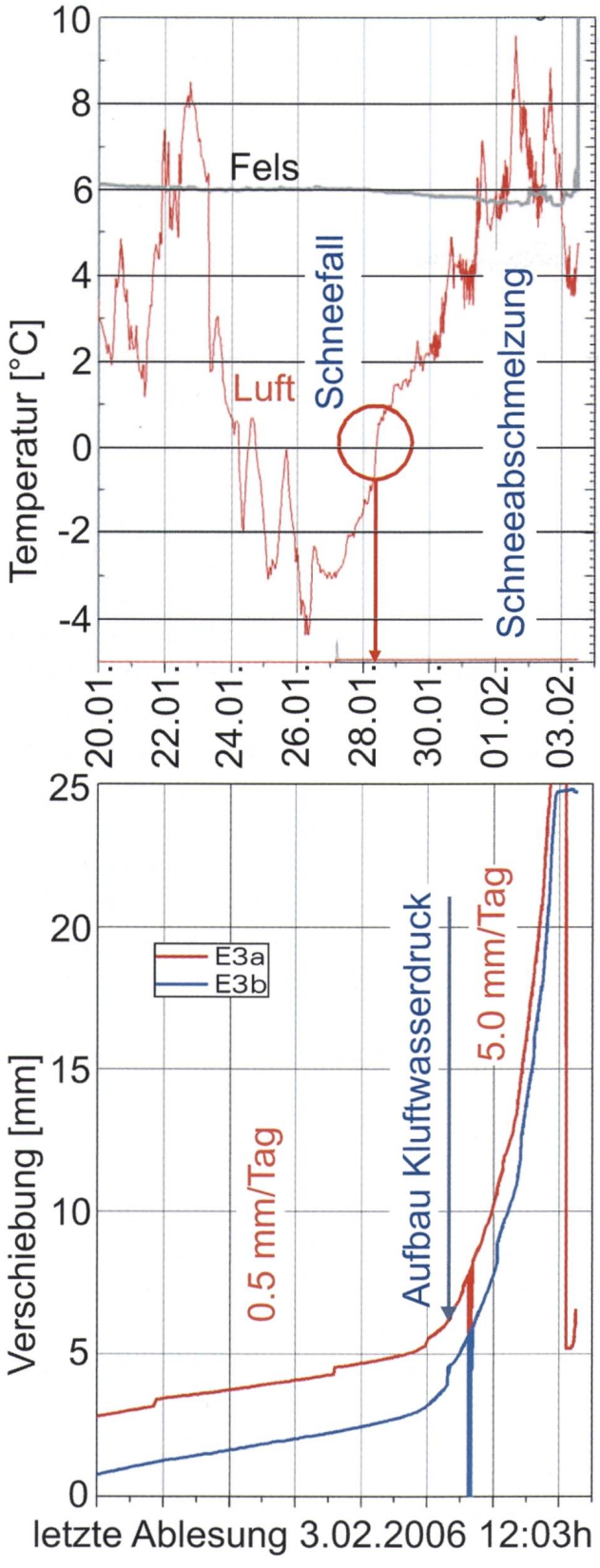


Fig. 4: Kluftwasserdruck infolge des Abschmelzens frisch gefallenen Schnees kann in der kalten Jahreszeit die Verschiebungsgeschwindigkeiten bis um Faktor 10 erhöhen. Dies führte im Val d'Infern 5 Tage nach Beginn der Tauphase am 3. Februar 2006 als Trigger zum Absturz von 20'000 m³ Fels (E: Extensometer [6]).

Spannungen die in Trennflächen durch Eisbildung (Frost) oder durch Kluftwasserdruckerhöhung infolge von Niederschlägen oder abschmelzenden Schnees entstehen, sind verglichen zu den gravitativ einwirkenden Spannungen um Faktoren bis Potenzen kleiner. Für die Entfestigung grosser Fels- und Bergsturzdispositionen sind sie mit Ausnahme der oberflächlichen Entfestigung vernachlässigbar. Sie können hingegen als Trigger dann wirken, wenn sie unmittelbar vor dem gravitativ gesteuerten «Ohnehinversagen» einer Sturzmasse eintreten. Das von Niederschlägen gespiesene Kluft- und Gebirgswasser kann als treibender Trigger einer progressiv sich verschiebenden Entfestigungsmasse wirken, wenn der Ablöseprozess schon so weit fortgeschritten ist, dass die verbliebenen Rückhaltekräfte in einer ähnlichen Grössenordnung wie die Kluftwasserdruckeinwirkungen sind. In diesem Fall befindet man sich auf der Zeitachse bereits in Nähe des Absturzereignisses ([24], Fig. 9b3).

Ein anschauliches Beispiel dieses Sachverhalts liegt vom «Chapf» vor, wo die durch Wassereinspeisung in der Ablösekluft erzeugte, künstliche Kluftwasserdruckerhöhung die Verschiebungsgeschwindigkeiten eines instabilen Felsturmes von ~ 275'000 m³ bis 80 mm/Tag zu erhöhen vermochten. Da die Scherwiderstände des Gesteins durch die gravitativen Einwirkung noch ungenügend reduziert waren, stand der künstlich erzeugte Kluftwasserdruck in keinem Verhältnis zu diesen und es konnte kein Bruch (Absturz) erzeugt werden. Der Turm wurde aus Sicherheitsgründen gesprengt [15, 16].

In der Praxis wird das Augenmerk oft zu stark auf einen ereignisauslösenden Trigger gelegt und zu wenig den zentralen Fragen des Entfestigungszustandes einer Sturzdisposition sowie ihrer Lage auf der Zeitachse zwischen Entfestigungsbeginn und Sturzereignis nachgegangen.

Typ	Zone	dominante Prozesse	erkennbare Phänomene
3a	Ablösezone	Temperatur-, Kluftwasserdruckwechsel	offene Klüfte, Spalten
3b	Kriechzone	Spannungskorrosion	vereinzelte Spannungsrisse
3c	Bruchzone	Gesteinsversagen (Bruch)	akustisches Knacken

Tab. 2: Zonierung nicht durch Gleitprozesse dominierter Sturzdispositionen.

3 Zonierung von Sturzdispositionen

Sofern ein Sturzereignis nicht durch reine Gleitprozesse vorbereitet wird, kann eine potenziell absturzgefährdete Felsmasse von oben nach unten generell in 3 Zonen unterteilt werden (Tab. 2).

Bei absturzgefährdeten Felsdispositionen bilden sich im Ablösebereich 3a bevorzugt entlang der Trennflächen offene Klüfte und Spalten aus. Bei spröd sich verhaltenden Felsformationen bewirkt der durch Temperatur- und Kluftwasserdruckwechsel erzeugte, dynamische Entfestigungsprozess, zyklisch einwirkende Spannungsänderungen. Durch das daraus resultierende, progressive Fortschreiten der Klüfte in die Gesteinstiefe baut sich die Kohäsion der Felsmasse von oben nach unten kontinuierlich ab. Die Ablösespalten zum festen Fels vergrössern sich stetig und der Fussbereich der sich ablösenden, potenziellen Sturzmasse wird zunehmend belastet (Fig. 5). Zusammen mit den latent vorhandenen, gra-

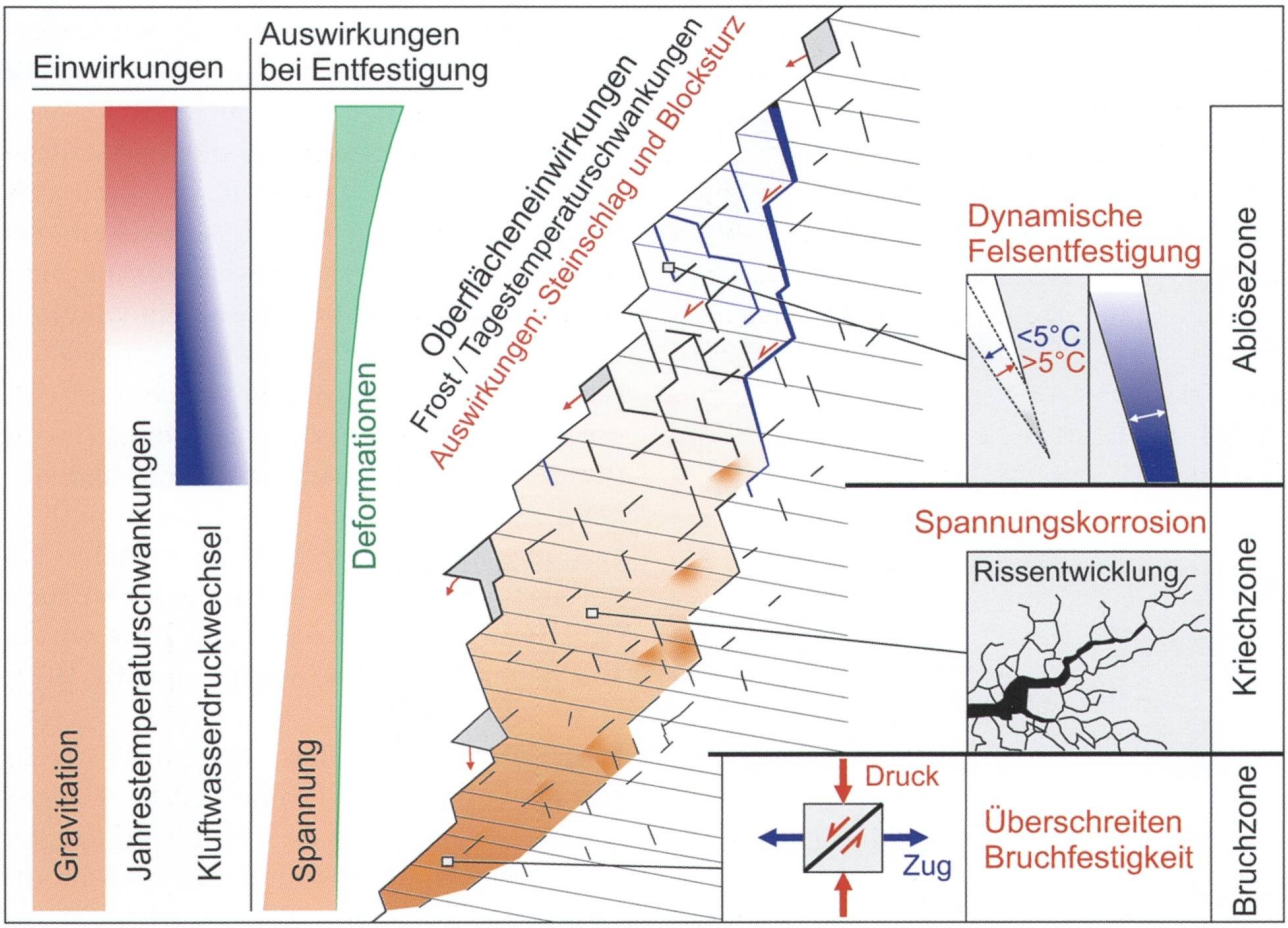


Fig. 5a: Bei Sturzdispositionen mit «Kippen/ Gleiten» als dominanter Prozesse kann die Felsentfestigung von oben nach unten in eine Ablöse-, in eine Kriech- und in eine Bruchzone unterteilt werden. Die infolge Einwirkungen von Temperatur und Kluftwasser kontinuierlich fortschreitende Ablösezone ist im Feld durch offene Spalten erkennbar. Dagegen bleibt die durch gravitative Einwirkungen gesteuerte Kriech- und Bruchzone meist verborgen.

Fig. 5b: Im «Kipp/Gleit»-Prozess erfolgt das Versagen als erstes in der Kriech- oder Bruchzone in dem im Feld meist kaum lokalisierbaren Fuss der Sturzmasse. Die in der Folge hängende Ablösezone folgt dem Sturzereignis hinterher (Val d'Infern [6]).

vitativen Zugspannungen kann dies in dem unterhalb der Ablösezone 3a verbliebenen, intakten Gestein des Fusses der potentiellen Sturzmasse zu Spannungskorrosion führen (Kriechzone 3b, [11]). Die anfänglich mikroskopisch entlang von Korngrenzen des Mineralgefüges beginnende Rissbildung führt im Gestein kleinräumig vorerst zu plastischen Verformungen, später zu visuell erkennbaren, propagierenden, nicht den Trennflächen folgenden Spannungsrissen.

Von Triaxialversuchen ist bekannt, dass es in Gesteinen, welche auf 90 bis 95% der Bruchspannung belastet werden, nach einem längeren Zeitraum ohne Lasterhöhung zum Bruch kommt. Durch Kriechprozesse werden plastische Verformungen zugelassen bis die Dehnung soweit fortgeschritten ist, dass propagierende Risse ein Ausmass erreichen, wo es zum Kollaps kommt. Da bei diesem Prozess mit zunehmender Dehnung bis zum Eintreten des Bruchs keine zusätzliche Energie zugeführt werden muss, spricht man von Kriechen oder von Spannungskorrosion (Fig. 6).

Mit der im Laufe der Zeit von oben nach unten fortschreitenden Ablösezone 3a wird die darunter liegende Kriechzone 3b von

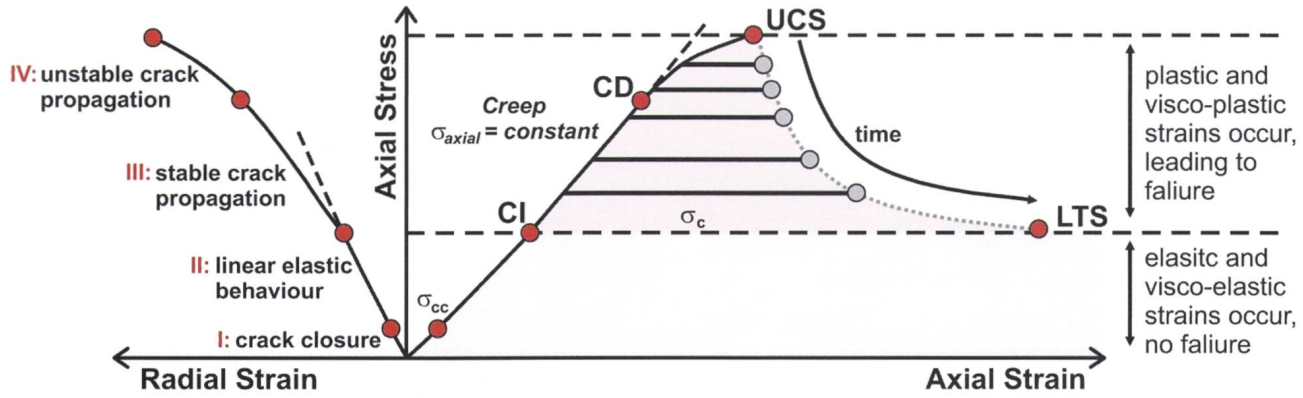


Fig. 6: Aus Triaxialversuchen ist bekannt, dass Felsproben unterhalb der Bruchlast ohne weitere Lasterhöhung einem Kriechen unterworfen sind und mit zunehmender Dehnung, bei Erreichen der «relaxierenden Bruchlinie» in den Bruchzustand übergehen ([13] CI: crack initiation; CD: critical damage; USC: unconfined compressiv strenth; LTS: long-term strength σ_c: applied constant stress).

oben her laufend partiell entspannt und die Kriechzone 3b selbst verschiebt sich ebenfalls kontinuierlich weiter nach unten. Oft ist an der Felsoberfläche der frontalen Wand während dieses über Jahrhunderte andauernden Vorgangs visuelle kaum eine Veränderung zu erkennen. Dieser Entfestigungsprozess kann quasi unbemerkt im Verstecken erfolgen, was ihn oft unberechenbar macht (Val d'Infern [2], Mesocco [14], Piz Cengalo [17], Preonzo [18], Randa [26]).

Das Sturzereignis kann auf zwei verschiedene Arten eintreten. In einer homogenen Gesteinsformation kollabiert die Felsmasse in der unter konstanten Spannungsverhältnissen stehenden Kriechzone 3b dann, wenn die Rissentwicklung und plastische Deformation soweit fortgeschritten sind, dass der massgebende Scherwiderstand des Gesteins überschritten wird.

In einer heterogenen Gesteinsformation, wo ein Gestein A von einem Gestein B einer niedrigeren Druck- und Zugfestigkeiten unterlagert wird, kann die Bruchspannung des Gesteins B bereits überschritten werden (Bruchzone 3c), wenn das Gestein A sich noch im Kriechzustand der Spannungskorrosion befindet (Zone 3b).

Dies macht die Angelegenheit in verschiedener Hinsicht komplex. Im Feld ist kaum feststellbar, wo sich der kritische Fuss, d.h. wo sich die Kriech- und/oder Bruchzone einer absturzgefährdeten Sturzmasse befindet. Damit lässt sich das potenzielle Absturzvolumen meist nur ungenau abschätzten. Bis es zu einem Versagen in der Kriechzone 3b kommt werden grössere Verschiebungen zugelassen, als wenn dies in der Bruchzone 3c erfolgt. D.h. die bis zu einem Sturzereignis führenden Verschiebungsdistanzen und Verschiebungsgeschwindigkeiten sind in jeder Sturzdisposition individuell und von den geometrischen, geologischen und felsmechanischen Randbedingungen abhängig.

Bei dem in zwei Ereignissen vom 18.04. und 09.05.1991 mit einem totalen Volumen von 30 Mio. m^3 niedergegangenen Bergsturz von Randa kam es am 17.04. beim Fuss der Sturzmasse zu explosionsartigen Ablösungen von Felsplatten [26]. Und am 18.04. begannen die Sturzereignisse im unteren Teil der Felswand im Randagneis, d.h. in der Kriech- 3b und Bruchzone 3c. Ebenfalls durch ein Fussversagen erfolgte der Felssturz in den Gneisen des Val d'Infern (Fig. 5b).

In der duktilen Kriechzone 3b sind kaum akustisch erkennbare Knackgeräusche zu erwarten. In der Bruchzone 3c können sie meist kurz vor dem Sturzereignis, bei sehr grossen Sturzmassen schon viel früher auftreten. Im Val d'Infern mit einem Sturzvolumen von 20'000 m^3 waren solche in dem hinter der Abbruchfront liegenden Tunnel ~ 8 h vor dem Sturzereignis laut zu hören [2].

Typ	Erkennungsart	Merkmal/ Phänomen/ Methode
4.2	Kritische, geologische Disposition	Lithologie, Trennflächendisposition, Exposition
4.3	Trennflächenabhängige Prozesse	Ablösen, Gleiten, Kippen
4.4	Relikte alter Sturzaktivitäten	Blockschuttfeld, Ausbruchnischen
4.5	Vorankündigung durch Sturzprozesse	erhöhter Steinschlag, Block-, Felssturz
4.6	Verschiebungsmessungen	Geodäsie, Joint-, Extensometer, Radar, Laser
4.7	Geophysikalische Messungen	Seismik (Schwingungsverhalten)
4.8	Weitere Messungen (Kraft, Spannung, Niederschlag, Temperatur, etc.)	Ankerkraftmessdosen, Druckkissen, Pluviometer, Luft-, Fels-Thermometer

Tab. 3: Merkmale und Methoden zur Erkennung von Felssturzdispositionen.

4 Erkennen von Felssturzdispositionen

4.1 Übersicht

Die Tabelle 3 gibt einen Überblick, wie Felsformationen mit einem erhöhten Absturzpotenzial und wie kritische Felssturzprozesse im Regelfall erkannt werden können.

4.2 Kritische, geologische Disposition

Feststellungen im Feld von stark entfestigtem Felsen, von offenen Spalten und Klüften sowie Anzeichen von Verschiebungsaktivitäten, wie aufgerissene Vegetationsdecken, von Klüften unabhängige Spannungsrisse, frisch abgebrochene Steine ohne Flechtenbewuchs, etc., können im anstehenden Felsen auf ein Sturzpotential aufmerksam machen (primär in der Ablösezone 3a).

Häufig findet man Felsformationen mit Entfestigungsphänomenen die alt und inaktiv sind. Vor Jahrtausenden versackter Felsen kann grossräumig bis zu 10er Meter offene Spalten aufweisen, ohne dass über Generationen bekannte, grössere Sturzereignisse eingetreten sind, ohne dass nennenswerte Verschiebungen gemessen werden können, und ohne dass davon in nächster Zeit eine Gefahr auszugehen hat (Bsp. Felstürme entlang von Sackungsränder).

In den meisten Fällen lassen sich die Sturzdispositionen grosser Felsmassen darauf beschränken, ob und in welcher Form potenzielle Gleitzonen auftreten. Steil stehende Trennflächen dienen meist als Ablöseflächen und sind in Felsformationen fast immer vorhanden. Treten einzelne davon als Gleitflächen auf, sind im Entfestigungsprozess meist zwei Gleitflächen einer unterschiedlichen, räumlichen Lage wirksam. Verschiebungen auf zwei Gleitflächen sind aus felsmechanischen Gründen stark behindert. In kleinräumigen Sturzdispositionen sind daher meist nur in gewisse Richtungen verlaufende Oberflächenanschnitte mit zwei Gleitflächen kritisch (häufig bei Baugrubenanschnitten und im Untertagebau). Bei vorspringenden Felsmassen von grossem Volumen, wo tiefe Erosionseinschnitte die seitlichen Freiheitsgrade erhöhen, können unter fehlenden Zwängungen steile Trennflächen als zweite Gleitfläche wirksam werden.

4.3 Trennflächenabhängige Entfestigungsprozesse

In der Praxis lassen sich grundsätzlich drei verschiedene, durch die Trennflächen bestimmte Entfestigungsprozesse unterscheiden, die unterschiedliche Sturzpotenzial beinhalten. In der Tabelle 4 werden verschiedene Trennflächendispositionen den für die Entfestigung massgebenden, kinematischen Prozessen und dem daraus generell zu erwartenden Felssturzpotenzial zugeordnet. Dies unter der Randbedingung, dass steile Trennflächen auftreten (Fig. 7).

Typ	Gleitdisposition	Prozess	Sturzpotenzial	Phänomen/ Beispiele
4.3.1	ausgedehnte Gleitzonen vorhanden	Gleiten	beschränkt, erhöht bis gross	Rutschung, Sackung; Brienz, Goldau, Steinbruch Arvigo
4.3.2	partielle Gleitzonen vorhanden	Kippen-Gleiten	erhöht bis sehr gross	Randa, Val d'Infern, Mesocco, Preonzo, Cengalo
4.3.3	keine Gleitzonen, schwacher «Fuss»	Kippen	klein bis gross	Chapf

Tab. 4: Trennflächenabhängige Entfestigungsprozesse und ihr Sturzpotenzial.

Bei den Typen 4.3.1 und 4.3.3 liegen unterschnittene Trennflächen bzw. ein geschwächter Fuss vor, welche die Felsmasse langfristig destabilisieren. Beim Typ 4.3.1 erfolgt dies im Regelfall infolge erosiver Unterschneidung und beim Typ 4.3.3 aus lithologischen Gründen, d.h. ein Fuss mit Gesteinen geringerer Druckfestigkeiten als das Überlagernde. Demgegenüber verfügt der Typ 4.3.2 meist über einen intakten, massiven und stabilen Fuss. Das macht das Erfassen der Felssturzdisposition «Kippen/Gleiten» so schwierig.

4.3.1 Gleitprozesse (Typ «Goldau»)

Ausgedehnte, geologisch meist durch die Schichtung (Lithologie) oder Schieferung (Tektonik) vorgegebene Gleitzonen mobilisieren über Jahrhunderte Felssackungen und -Rutschungen. Dabei entstandene, stark überhöhte Sackungsränder verstürzen periodisch mit infolge der resultierenden Geländeabflachungen meist abnehmendem Sturzvolumen [10]. Durch Gleitprozesse niedergegangene Bergstürze wie Goldau oder Elm sind seit Menschengedenken die Ausnahme [29, 31].

Beisst eine oder Scharen von Gleitzonen in einer überhöhten Felswand aus, bleibt das Sturzvolumen meist gut abschätzbar und beschränkt, da stets der vorderste Teil portionenweise über die Kante abbricht (Fig. 7, Steinbruch Arvigo [25]). Solche, von veränderlichen Geschwindigkeiten geprägten Gleitsysteme, sind im Regelfall träge. Sie bewegen sich oft nahe dem Grenzgleichgewicht, d.h. dem Grenzzustand von Stabilität und Instabilität, wo Einflüsse wie saisonaler Kluftwasserdruck oder extreme Trigger, wie Erdbeben, Bewegungsschübe und/oder Stur-

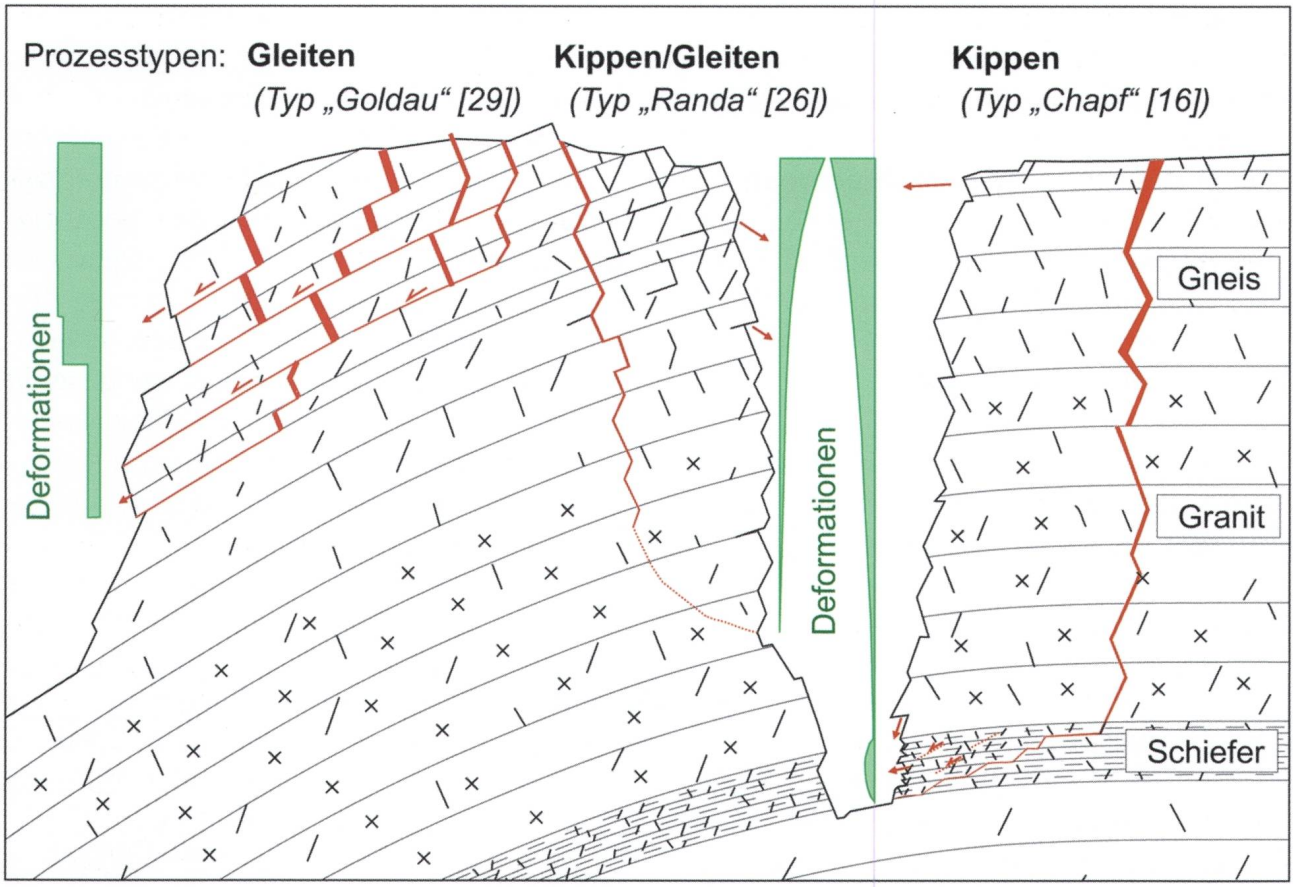


Fig. 7: Generell lassen sich Felsentfestigungen in 3 verschiedene Prozesstypen, Gleiten (Typ Goldau), Kippen/Gleiten (Typ Randa) und Kippen unterteilen (Typ Chapf). Für das Erkennen und Beurteilen von Sturzprozessen ist jener von Kippen/Gleiten (Fig. 5a) der anspruchsvollste (prinzipielle Lithologieangabe).

zereignisse auslösen können. Die in den Gleitfugen vorhandenen Rückhaltekräfte vermögen periodisch wieder Verlangsamungen zu bewirken, die teilweise bis zum Stillstand führen können. Meist ist die Rutschmasse in einzelne Felsschollen unterteilt, die sich gegenseitig beeinflussen und wo aus deren Zwängungen grosse Rückhaltekräfte aufgebaut werden können [10].

Die meisten, stabilitätsmässig sehr kritischeren Rutschsysteme von Bergsturzvolumen sind gegen Ende von gravierenden, geomorphologischen Veränderungen, wie dem Rückzug der Gletscher und der Ausbildung von sehr grossen, topographischen Überhöhungen, bereits vor Jahrtausenden als Bergsturz abgefahren ([31] Flims, Totalp Davos, Brienz/Brinzauls [10]).

Es gibt Lithologien, die über bescheidene Scherwiderstände verfügen und die in einem geologischen Modell als potenzielle Gleitzonen in Betracht zu ziehen sind. Sie wurden von früheren Geologen oft als solche postuliert. Es lohnt sich stets die felsmechanischen Eigenschaften solcher Gesteine [29], die gesamte Trennflächendisposition, das Potential von Zwängungen verschiedener Gleitschollen, etc., detailliert abzuklären, damit ein plausibles, kinematisches Modell entwickelt, und das wahrscheinliche Sturzpotential einer Gleitmasse eruiert werden kann.

4.3.2 Prozesse Kippen/Gleiten (Typ «Randa»)

In Felsdispositionen wo ausgedehnte Gleitzonen fehlen, können in der Felsmasse dispers verteilte, lokale, potentielle Gleitzonen von nur geringer Ausdehnung auftreten, welche über steil stehende, als Ablöseflächen dienende Trennflächen aktiviert werden können. Da solch partielle, potenzielle Gleitzonen nur über andere Trennflächensystem verbunden sind, treten meist kombinierte, kinematische Prozesse, wie Kippen und Gleiten auf. D.h. durch das in der Ablösezone 3a Aufreissen der Klüfte und deren Fortschreitens in die Tiefe, durch Kippen von Felsbänken (Toppling), können partielle Gleitzonen über im Detail komplexe, kinematische Entfestigungsprozesse aktiviert werden [34]. Trennflächen können durch das Kippen zu partiellen Gleitflächen aktiviert werden. Wo eine Verbindung zwischen den lokalen Gleitzonen über Trennflächen fehlt, wirkt dem Entfestigungsprozess die Gesteinskohäsion intakter Gesteinsbänke entgegen. Ist die Lage von einzelnen, flachliegenden Gesteinsbänken für ein Gleiten ungünstig, muss die abstürzende Felsmasse zusätzlich über die «Zähne» vorstehender Felsbankstummel herausgehebelt werden (Kippen). Oft erfolgen diese Prozesse kurz vor oder während des Sturzereignisses.

Der Prozess «Kippen/Gleiten» tritt meist in einer vom Trennflächensystem her generell als günstig beurteilten Disposition auf, wo die Schieferung oder Gesteinsbankung bergwärts einfällt (Fig. 7). Dies war in Randa der Fall und es war damals schwierig zu verstehen, weshalb in dieser Disposition einer der grössten Bergstürze der Schweiz der letzten 100 Jahre mit insgesamt 30 Mio. m^3 Volumen entstehen konnte [26].

Da das Sturzereignis beim Prozess «Kippen/Gleiten» im Regelfall mit dem Versagen des Fusses ausgelöst wird (Abschnitt 3, Fig. 5b), werden die überlagernden Felsmassen in der Folge kurzfristig hängend. Dabei entstehen zusätzliche Freiheitsgrade, die das nach dem Ereignis in der Ausbruchnische festgestellte, Gleiten auf zwei Trennflächen, das Aushebeln über und das Brechen von Gesteinsbänken, begünstigen und in manchen Dispositionen überhaupt erst ermöglichen. Ob diese Prozesse vor oder erst während dem Sturzereignis erfolgten, lässt sich kaum bestimmen und bleibt oft ungewiss.

Solche komplexe Ablöse-, Kipp-, Gleit-, Aushebelungs-, Kriech- und Bruch- Prozesse

können sich über hohe Felswände erstrekken und sehr grosse Absturzvolumina von mehreren 100'000 m³ bis hin zu sehr grossen Bergsturzvolumina generieren (Cengalo [17], Randa [26]). Ihre Entfestigung ist an der bewegten Felsfront oft kaum durch Kluft- und Rissöffnungen und nur im oberen Ablösebereich durch deutliche Spaltenbildung zu erkennen, was das Abschätzten des Sturzvolumens schwierig macht.

4.3.3 Prozess Kippen (Typ «Chapf»)

Fehlen in einer Felsdisposition jegliche, potentiellen Gleitzonen so kann sich eine Sturzgefährdung fast nur durch ablösende, grosse Spaltenöffnungen und durch Kippprozesse ausbilden. Verfügt eine überhöhte Felsformation über einen Fuss aus einem Gestein von einer geringeren Festigkeit als die Ablösemasse, kann diese im Fuss plastische Verformungen zulassen, was ein Kippen der überlagernden Felsmassen begünstigt. Solche Dispositionen sind schwierig zu erkennen und Sturzereignisse kündigen sich oft im Voraus kaum an. Sie bilden eher den seltenen Fall von Sturzdispositionen (Chapf, Innertkirchen [15]).

4.4 Alte Sturzzeugen

Da grosse Sturzereignisse selten bis sehr selten sind und das 300-jährige Ereignis übersteigen können, sind Zeugen alter Sturzaktivitäten meist nicht sehr hilfreich, um ein für das aktuelle Zeitgeschehen relevantes Sturzpotential erkennen zu lassen. Bei bevorstehenden Sturzereignissen geben sie uns aber gute Anhaltspunkte für die zu erwartende Ausdehnung von Sturzkegeln. An ihnen können beispielsweise Sturz- und Fliessmodellierungen geeicht und die Plausibilität deren Ergebnisse überprüft werden.

4.5 Sturzaktivitäten

Rein felsmechanisch muss sich ein grosser Fels- oder Bergsturz nicht zwingend durch vorgängige Sturzereignisse ankündigen und sie brauchen auch nicht notwendigerweise einen Trigger (Einwirkung Abschnitt 2.5). In der Praxis kündigen sich grosse Sturzereignisse vorher jedoch meist kurz oder längerfristig durch kleine oder grosse Sturzprozesse an. Bei der 20'000 m³ umfassenden Sturzmasse des Val d'Infern ereigneten sich die ersten Felsstürze bereits 10 Jahre vor dem Hauptereignis und intensiver Steinschlag setzte 6 h zuvor ein [6]. Je nach der lokalen Disposition erfolgt dies in sehr unterschiedlicher Form. Es gibt Fälle wo ein Felssturz quasi aus dem Nichts erfolgt oder solche, wo ein bevorstehender Bergsturz durch mehrere Felsstürze angekündigt wird. Bei Randa gab es im Winter 1990/1991 intensiven Steinschlag aus Rissen heraus und Anfang 1991, vor dem ersten Bergsturz vom 18.04. kleine Felsstürze [26]. Es gibt keine Muster.

Bei kritischen Sturzdispositionen ist den Steinschlag- und Felssturzaktivitäten hinsichtlich der zeitlichen Vorhersage eines Sturzereignisses, wie auch des Gefahrenmanagements grosse Beachtung zu schenken (Abschnitt 8.1).

4.6 Verschiebungsmessungen

Mit der modernen Messtechnik liegen effiziente und heute teilweise auch kostengünstige Mittel vor, mit Hilfe derer minimal die Verschiebungsaktivitäten von Felsmassen festgestellt werden können. Sie sind aber auch in der Lage anzugeben, in welchem zeitlichen Bereich eine entfestige Felsmasse sich entlang der Zeitachse bis hin zum Absturzereignis befindet (Abschnitt 5).

In der Tabelle 5 sind gängige Methoden der Verschiebungsmessungen mit der Angabe deren Eignung einander gegenüber gestellt. Bei den Methoden 4.6a bis 4.6c ist man darauf angewiesen, dass die Messstellen am richtigen Ort, d.h. an einem aussagekräftigen Standort angebracht werden, ansonsten

bleiben Verschiebungen verborgen und es können falsche Beurteilungen vorgenommen werden. Dies ist insbesondere bei den Jointmetern (4.6b) von grosser Bedeutung. In jedem Fall erfordert es vorgängig zwingend eine detaillierte, geologische und kinematische Felsdispositionsanalyse.

Bei der Geodäsie müssen im Messbereich stabile Referenzpunkte vorhanden sein (4.6a). Der Fehler ist in geringem Masse von den atmosphärischen Bedingungen abhängig und kann messtechnisch genau bestimmet werden.

Bei den oberflächlich über Trennflächen und Spannungsrisse versetzten Jointmetern oder den in Bohrlöchern installierten Extensometern ist der Messfehler gerätebedingt mit 1/100 mm sehr gering (sind weitgehend temperaturkompensiert). Kleinste Bewegungen, d.h. quasi das «Atmen» des Felsens können gemessen werden. Die oft über längere Distanzen installierten Extensometer geben linear die relativen Verschiebungen über einen Längenbereich an, daher werden oft im gleichen Bohrloch Mehrfachextensometer über verschiedene Distanzen eingesetzt.

Bei den Inklinometern gibt es eine grosse Palette von Messeinrichtungen (4.6c). Sie können die x-, y-Achsen oder zusätzlich auch die z-Achse messen (Zug oder Stauchung, vertikal oder geneigt). Im Regelfall werden sie in Bohrlöchern über längere Distanzen versetzt. Meist sind Messrohre, seltener Glasfaser- oder andere Drähte im Einsatz. Bei den Letzteren können nur die Verschiebungstiefen, nicht aber die genaue Verschiebungsrichtung und der Verschiebungsbetrag bestimmt werden. Für jede Anwendung ist das geeignete System zu wählen.

Bei den «indirekten» Methoden 4.6d, 4.6e wird die Veränderung von Oberflächen gemessen. Der Vorteil ist, man kann aus grossen Distanzen berührungsfrei Flächen messen. Die Ergebnisse müssen immer interpretiert werden, da die Messergebnisse in steilen Felsflächen Verschiebungen, Lücken aus Felsausbrüchen oder Auflandungen von abgelagertem Sturzmaterial bedeuten können. D.h. man misst nicht zwingend eine Verschiebung. Die Messungen sind von Störfaktoren der Oberflächenbeschaffenheit, wie Vegetation, Felsbruchkanten, etc., sowie von störenden, atmosphärischen Einflüssen beeinflusst. Der Fehler kann nicht gemessen sondern muss abgeschätzt werden. Unterschiedliche Messgeräte haben verschiedene Reichweiten und Auflösungen. Diese Methoden sind ungenau und eignen sich fast nur für rasche Verschiebungen in der Grössenordnung von dm bis m/Jahr.

Der Laserscan ist um Faktor ~ 10 ungenauer als die Radarinterferometrie. Der Radar hat den sehr grossen Nachteil, dass die Interferometrie infolge der gerätebedingten Wellenamplitude nach ~ 9 mm Oberflächenveränderung die «Messuhr» wieder auf null zurücksetzt (4.6d). Kennt man die Verschiebungsgeschwindigkeiten nicht, so weiss man entweder nicht, welche Messintervalle anzuwenden sind oder man erhält in den mit den Farbcodierungen gekennzeichneten Ergebnisbilder mehrere Wellenphasen, aus denen eine Zuordnung der möglichen Phänomene, wie Verschiebungen, Erosion und Auflandungen nur schwer vorgenommen werden kann. Die

Typ	Messung	Art / Genauigkeit	Eignung
4.6a	Geodäsie	absolut / mm (bis cm)	punktuell, ab kleinen Verschiebungen
4.6b	Joint-, Extensometer	relativ / 1/100 mm	linear, Deformationszonen, -Bereiche
4.6c	Inklinometer	relativ / 0.15 mm/m	linear, Deformationszonen, -Bereiche
4.6d	Radarinterferometrie	indirekt / mm (unsicher)	grosse, rasch bewegte Oberflächen
4.6e	Laserscanning	indirekt / cm (unsicher)	grosse, rasch bewegte Oberflächen

Tab. 5: Methoden der Verschiebungsmessungen.

Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse durch Dritte ist stark erschwert bis fast unmöglich. Fast alle genannten Messsysteme können in einzelnen Einsätzen oder über längere Zeit als kontinuierliche Messsysteme eingesetzt werden. Es gibt dabei die verschiedensten Stromversorgungs-, Datenerfassungs-, Datenübermittlungs- und Auswertungssysteme. Sie können massgeschneidert und kostenoptimiert für die jeweiligen Fragestellungen und Randbedingungen gewählt werden. Dieser Markt unterliegt einer raschen Entwicklung.

4.7 Geophysikalische Messungen

Mit selbstanregender, hochempfindlicher Seismik kann das Schwingungsverhalten einer Felsformation festgestellt werden, was Auskunft über den relativen Entfestigungsgrad einer Formation sowie den Bewegungssinn bzw. die vorhandenen Freiheitsgrade derselben angeben kann (Mesocco, Val d'Infern [19]). Sie können in der Praxis dazu dienen, ein aus geologisch-geomorphologischen Aufnahmen und/oder durch Verschiebungsmessungen erarbeitetes, kinematisches Entfestigungsmodell einerseits zu bestätigen. Anderseits ermöglichen sie grundsätzlich den Entfestigungsgrad einer Sturzdisposition festzustellen. Man darf gespannt sein, wie weit sich die Anwendung dieser Methoden noch entwickeln kann.

4.8 Weitere Messungen

Anstelle von Deformationsmessungen können Instabilitäten auch mit Spannungsveränderungen erkannt und verfolgt werden. Anker können in instabilem Felsen mit Ankerkraftmessdosen ausgerüstet werden, die als redundantes System zu den Verschiebungsmessungen das Felsverhalten angeben. So konnte beispielsweise an mehreren Objekten das mit oberflächlichen Joint- und in Bohrlöchern versetzte Extensometern festgestellte, Temperatur- und Kluftwasserabhängige, saisonal elastisch-plastische Deformationsverhalten des Felsens mit einem redundanten System der Ankerkraftmessungen bestätigt werden (Fig. 8). An geeigneten Stellen können auch Druckkissen eingesetzt werden, ihre Anwendung ist aber oft stark limitiert (Problematik Druckschatten, etc.).

Pluviometer sind nicht stets erforderlich, um die lokalen Niederschlagsmengen zu erfassen. Meist genügt der Datenbezug einer meteorologischen Messstation aus der Talschaft. Thermometer sind heute in vielen Geräten und Messgebern enthalten. Beide Messdaten sind für die Interpretation der Temperatur- und Kluftwasser-abhängigen Verschiebungsanteile von wesentlicher Bedeutung.

Typ	Methode	Stellenwert	Aussagekraft, Ergebnis
5a	Geologische, geomorphologische Feldaufnahmen	Grundlage für gezielte Sondierungen und für Instrumentierungen	Analyse Trennflächensystem, erste Idee des Entfestigungsprozesses sowie des kinematischen Modells
5b	Felsmechanische Laboranalysen	fallweise als Ergänzung zu 5a	felsmechanische Analyse, Felskennwerte
5c	Sondierungen (Bohrung)	fallweise als Ergänzung zu 5a	Lithologie, Zustand Felsen, Wasserverhältnisse, Probennahme, Bohrlochversuche
5d	Instrumentierungen (primär Verschiebungsmessung, Abschnitt 4.6)	wesentliche Grundlage für Gefahrenanalyse	Bestätigung Entfestigungsprozess und Kinematikmodell, verfolgen Verschiebungspfad, ermöglicht Gefahrenbeurteilung
5e	Modellierungen	fallweise je nach Prozessart, -Grösse	Verlauf, Ausdehnung von Schuttkegeln, Murgängen, etc.

Tab. 6: Methoden zur Abklärung von Sturzgefährdungen.

5 Abklärung von Sturzgefährdungen

Das zentrale Ziel der geologisch-felsmechanischen Abklärungen muss sein, den Entfestigungsprozess der absturzgefährdeten Felsmasse sowie deren Kinematik zu erkennen und zu verstehen. Nur dies ermöglicht einen zielgerichteten und aussagekräftigen Einsatz der Instrumentierungen. Es gibt Praxishilfen für den Einsatz von messtechnischen Frühwarnsystemen [20]. Ihr Einsatz ist aber nur dann wirkungsvoll, wenn die installierten Messeinrichtungen am richtigen Ort und in der korrekten Position sind.

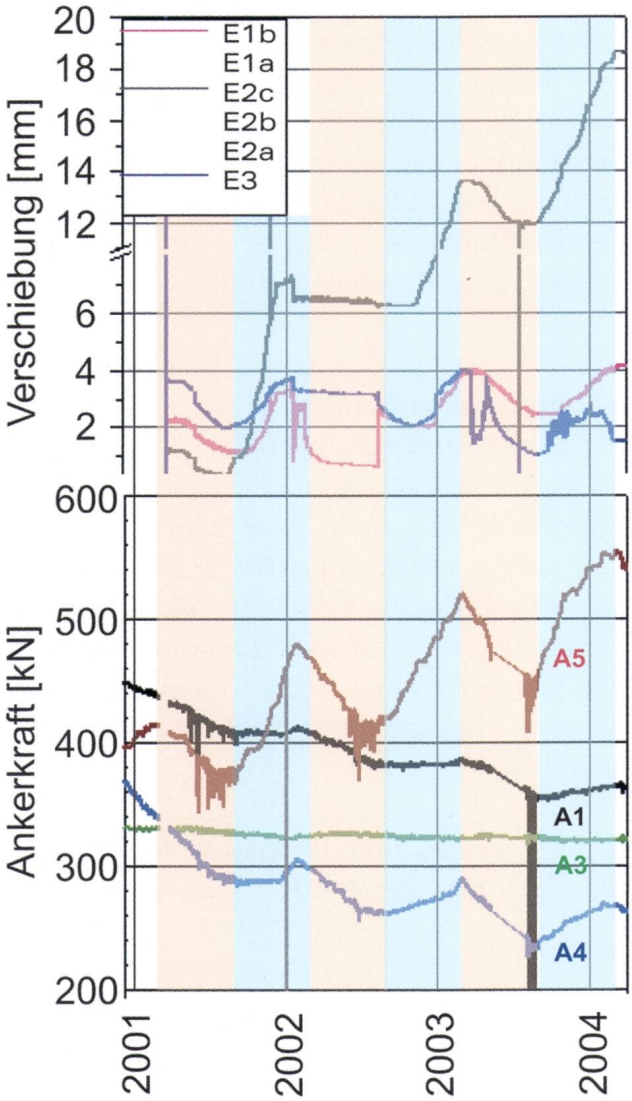


Fig. 8: Ankerkräfte können als redundantes Messsystem das zyklische Verhalten der Verschiebungsmessungen bestätigen. In Poschiavo korrelierten die über 3 Jahre in der kalten Jahreszeit (blau) gemessenen Verschiebungsschübe sowie die sommerlich rückläufigen (rot), elastischen Verformungen der in Bohrlöchern versetzten Extensometer E1a bis E3 mit den Ergebnissen der im Fels vorgespannten Anker A1 bis A5 [2].

In der Tabelle 6 sind die wesentlichen Methoden aufgeführt, welche für eine Abklärung einer Sturzgefährdung im Fels erforderlich sind und die sich in der Praxis bewährt haben.

5a) Geologische und geomorphologische Feldaufnahmen werden heute immer weniger durchgeführt und zunehmend durch kartographische Methoden am Bildschirm ersetzt. Auch Felstrennflächenbestimmungen werden zunehmend anhand von Geländemodellen gemacht. Es handelt sich um eine gefährliche Entwicklung, da die beste Datenqualität nur in Kombination von beidem erreicht werden kann.

Feldaufnahmen sind unabdingbar, um die Kinematik entlang von Trennflächen, Geländestrukturen, Felsschollen, sowie den Entfestigungsprozess, erkennen und verstehen zu können. Im Feld erkennt man ob aktive Zug-, Scher- oder Stauchbewegungen stattfinden, ob Spannungsrisse auftreten (Kriechzone), oder ob in der Kinematik auch alte, inaktive geologische Phänomene mitberücksichtig werden müssen. Wenn dabei der Untersuchungsperimeter zu klein gewählt wird, können alte Strukturen unerkannt bleiben und eine allfällige Beeinflussung des Untersuchungsgebietes durch grossräumigere Massenbewegungen bleibt unberücksichtigt [10].

Beispielsweise ist der Entfestigungsprozess des in den Augengneisen abgefahrenen Sturzereignisses in Preonzo von 2010 nicht restlos geklärt [24]. Verglichen zur Felswandneigung von 55° - 65° konnten für den Prozess «Kippen/Gleiten» keine entsprechenden, partiellen Gleitzonen gefunden werden [18]. Gemäss den FLAC-Modellierungen wurde zudem eine grössere Sturzmasse mit einem Versagen in den tiefer liegenden, felsmechanisch schwächeren Bändergneisen erwartet

[23]. Nach einer Folge mehrerer Sturzereignisse von 1702, 2002, 2010, 2012 ist fraglich, ob nicht bisher unerkannte, alte Strukturen grossräumiger Massenbewegungen existieren, die tiefgreifende Ablösezonen generierten (Sackungen), unterhalb derer eine überbeanspruchte Kriech- oder Bruchzonen zu gegebenem Zeitpunkt das Sturzereignis in den Augengneisen ohne Einwirkung eines Triggers verursachte (Abschnitt 3).

Nach den Feldaufnahmen muss die erste Idee des Felsentfestigungsprozesses vorliegen und das kinematische Modell postuliert sein. Nur so hat man Chancen die nachfolgende Instrumentierung an den richtigen, aussagekräftigen Trennflächen und Strukturen zu platzieren. Für eine wirklichkeitsnahe Beurteilung ist dies unabdingbar.

5b) Felsmechanische Laboruntersuchungen können fallweise zweckmässig und für die felsmechanische Analyse hilfreich sein. Je nach der Fragestellung sind die entsprechenden Felsparameter zu ermitteln. Erfahrene Prüflabors beraten kompetent, welche Versuche für die entsprechenden Parameter geeignet sind.

5c) Gleiches gilt für Sondierungen von denen meist Bohrungen zur Anwendung gelangen, woraus auch gezielt Felsproben aus der Tiefe gewonnen werden können. Im Regelfall dienen die Bohrungen primär der Instrumentierung und/oder für Bohrlochversuche.

5d) Neben den Feldaufnahmen bilden die Instrumentierungen den zweiten, zentralen Teil, damit eine fundierte Beurteilung einer Sturzgefährdung vorgenommen werden kann (Abschnitt 6). Generell hat sich substantiell und wirtschaftlich bewährt, die Instrumentierung als einen iterativen Vorgang zwischen Feldaufnahmen, Datenauswertung, Beurteilung sowie Konzipierung, Ergänzung oder Aktualisierung der Instrumentierung, vorzunehmen.

5e) Die Auswirkungen von Steinschlag, Block-, Fels- und Bergsturz können heute mit verschiedenen Programmen modelliert werden. Werden die Grundsätze der Modellierungen eingehalten, wie gute Datenqualität der Eingabeparameter, Eichung des Programms anhand von Naturgegebenheiten, Plausibilitätsüberprüfung, etc., können wirklichkeitsnahe Ergebnisse erzielt werden.

6 Beurteilung von Sturzgefährdungen

Die Beurteilung einer Sturzgefährdung, welche möglichst die effektiven Verhältnisse erfasst, ist anspruchsvoll. Sie bildet die Voraussetzung damit eine zeitliche und räumliche Prognose eines Sturzereignisses überhaupt vorgenommen werden kann (Abschnitt 8).

In der Tabelle 7 sind die wichtigsten Elemente aufgeführt, die als Basis einer fundierten

Typ	Element	Aufgabe, Stellenwert	Ergebnis/ Hilfsmittel
6a	Datenqualität	muss geprüft, hinterfragt, evtl. verbessert werden	je nach der Qualität sind Aussagen zu relativieren oder nicht möglich
6b	Datenanalyse	ist die Basis jeder Prozesserkennung	Erkennen von Entwicklungen, Korrelationen, Abhängigkeiten
6c	Prozesserkennung	Ist die Voraussetzung für eine fundierte Beurteilung	Art der Entfestigung, Kinematik, zeitliche Entwicklung, Verkettungen
6d	Beurteilungsschema	erleichtert zielgerichtete Massnahmeneinleitung	Ablaufschema, Entscheidungsbaum, Beurteilungskriterien festgelegt

Tab. 7: Wesentliche Beurteilungselemente.

Beurteilung zu klären sind bzw. vorgenommen werden müssen.

6a) Oft wird der Datenqualität zu wenig Beachtung geschenkt, obwohl sie von zentraler Bedeutung ist (Messfehler, Störfaktoren, Mess- und Datenrobustheit, Repräsentativität, aussagekräftige Messstandorte, -Richtungen, etc.). Die Datenqualität ist quasi das Blut des Beurteilungsgegenstandes. Bereits bei der Wahl der Instrumentierungsmethode muss die Datenqualität im Vordergrund stehen. Erhalte ich die richtige Information in ausreichender Genauigkeit? Anbieter von Messsystemen verhalten sich aus verkaufstechnischen Gründen diesbezüglich oft zu wenig kritisch und es braucht die Erfahrung und Hartnäckigkeit des Geologen, um die richtige Wahl zu treffen und durchzusetzen. Bei der messtechnischen Beurteilung einer Sturzgefährdung ist die Datenqualität erneut zu hinterfragen und gegebenenfalls zu korrigieren.

6b) Die Datenanalyse ist das Herzstück jeder Beurteilung. Dabei sind alle Daten inklusive jener der Feldergebnisse einzubeziehen. Oft wird viel gemessen und wenig oder zu wenig detailliert ausgewertet und analysiert. Die Datenanalyse ist nicht nur vor einem Sturzereignis sondern auch während des Gefahrenmanagements und danach von essentieller Bedeutung.
Für die Datenauswertung stehen viele numerische und graphische Programmunterstützungen zur Verfügung. Bevor diese zur Anwendung gelangen bewährt es sich, ein Datenanalyse- und Visualisierungskonzept zu erarbeiten (welche Parameter müssen miteinbezogen werden, welche sind einander gegenüberzustellen, welche Werteeinheiten sind zweckmässig, wie kann ich die Ergebnisse für den Nichtfachmann übersichtlich und leicht verständlich visualisieren? etc.). Um Vergleiche zwischen unterschiedlich aktiven Felskörpern oder von verschiedenen Messsystemen zu erleichtern, sind normalisierte Angaben, wie beispielsweise bei Verschiebungsmessungen die Angabe der Geschwindigkeiten zweckmässig. Die fundierte Prozesserkennung oder eine Modellbestätigung wird damit begünstigt.

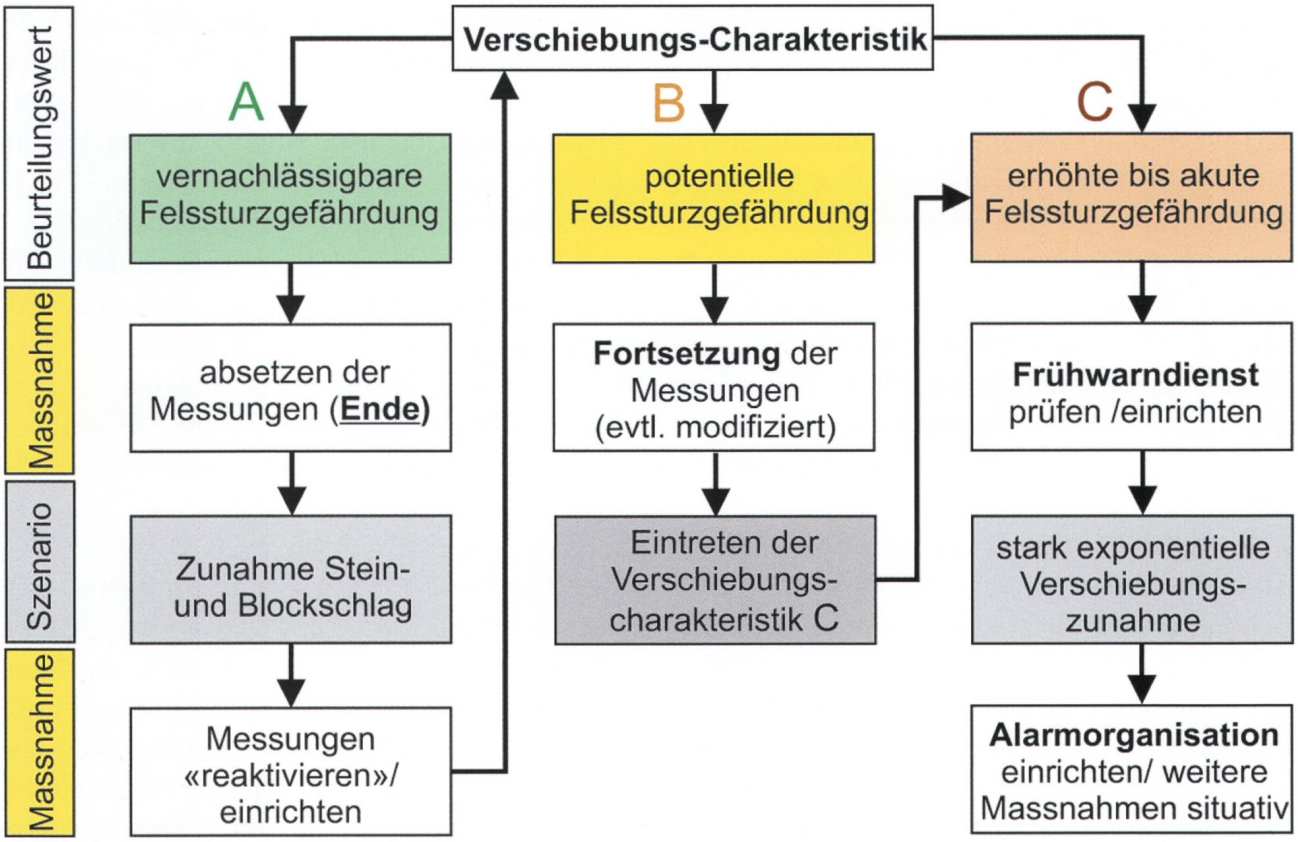
Die Erkennung von Sturzgefährdungen ist mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln relativ gut möglich (Abschnitt 4). Bedeutend schwieriger ist es, die zeitliche Position eines Felskörpers von Beginn der Entfestigung bis zum Absturz auf der Zeitachse abschätzen, geschweige denn überhaupt bestimmen zu können. Dabei nimmt die Felssturzgefährdung in Richtung zunehmender Zeitachse kontinuierlich bis progressiv zu, was Jahrzehnte dauern kann. Jedes Sturzpotenzial ist ein Unikat und Vergleiche mit anderen Objekten sind kaum möglich.

Je nachdem wo man sich auf dieser Zeitachse befindet, werden andere Massnahmen erforderlich. Für den Werkeigentümer ist es schwierig zu entscheiden, ob und wann eine Instrumentierung zu einem Frühwarndienst oder zu einem Alarmsystem ausgebaut werden soll, oder ob die Messungen nach einer längeren Messzeit allenfalls wieder abgesetzt werden können. Da dies einerseits kostenrelevant ist und anderseits ein Fehl-

Verschiebungs-charakteristik	Deformationsart	Erwartete Felssturzgefährdung	Überwachungsmassnahme (Messungen)
A: unkritisch	primär elastisch	vernachlässigbar	absetzen (Ende)
B: wenig kritisch	± linear plastisch [1)]	potentiell	fortsetzen/ modifizieren
C: kritisch	progressiv plastisch [1)] (exponentiell)	erhöht bis akut	fallweise Frühwarndienst, Alarmorganisation einrichten

[1)] bzw. bleibende Verschiebung

Tab 8: Abschätzung der Sturzgefährdung anhand der Verschiebungscharakteristik.



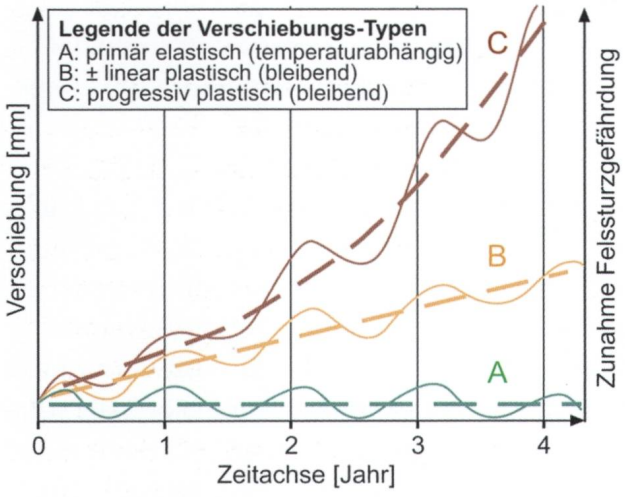
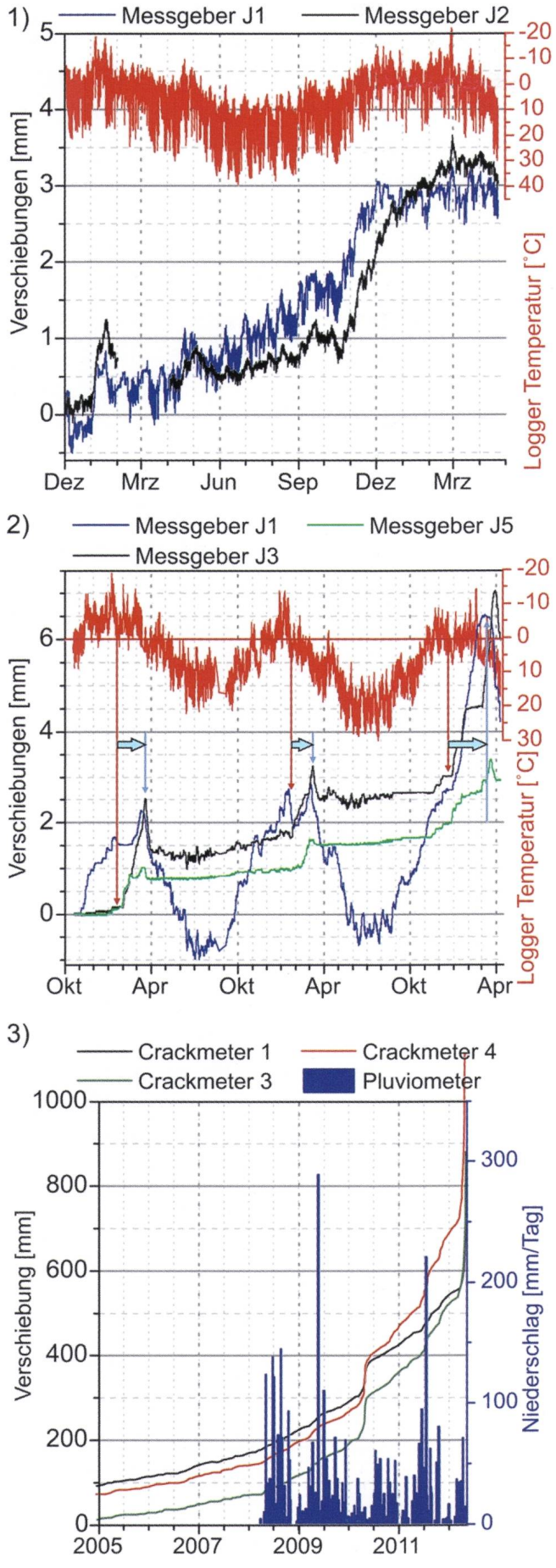


Fig. 9a: Mit Hilfe eines Beurteilungsflowcharts kann entsprechend den verschiedenen Verschiebungscharakteristiken von Felssturzdispositionen eine zielgerichtete, kosten-/risikooptimierte Massnahmenplanung vorgenommen werden. Die oberflächennah, temperaturbedingt gemessenen, saisonalen Verschiebungsperiodizitäten sind entsprechend zu berücksichtigen.

Typ	Massnahme	Funktion	Ergebnis, Thema
7a	Überwachung	Schutz vor Überraschung	Verschiebungscharakteristik bestimmen, ausserordentlicher Fall erkennen
7b	SOMA *)	kurzfristig Sicherheit erhöhen	fallweise angepasste Massnahmen
7c	Organisation	institutionelle Vorbereitung soll Handlungsfreiheit ermöglichen	Alarmorganisation, Kommunikation, Hilfeleistungen, Erhalt Infrastruktur
7d	Bautätigkeit	Schutz vor oder Ausweichen den Gefahren	fallweise kurz- bis langfristig konzipierte Bautätigkeiten

*) SOMA: Sofortmassnahmen

Tab. 9: Übersicht wesentlicher Massnahmen.



entscheid einen grossen Schaden verursachen kann, kommt diesen Entscheiden der Verantwortlichen eine grosse Bedeutung zu. Das Dilemma ist: Aus übertriebener oder ungerechtfertigter Vorsicht sollen nicht unnötige Kosten generiert werden. Und aufgrund der Befürchtung hoher Kosten soll auf erforderliche Messungen nicht verzichtet werden.

Die Instrumentierung von Klüften und Rissen in der am stärksten bewegten Ablösezone 3a mit rissüberbrückenden Telejointmetern oder in der Tiefe mit Extensometern einer Messgenauigkeit von 1/100 mm hat sich in den letzten fast 30 Jahren sehr bewährt (4.6b). Das Versetzen von Jointmetern an exponierten Felsoberflächen ist oft nicht einfach aber verglichen zu Bohrlochinstrumentierungen meist kostengünstig. Damit lässt sich das Entfestigungs- und Deformations-Verhalten des Felsens in der Oberflächenzone präzise erfassen. Die an der Felsoberfläche sehr häufig eingesetzten Jointmeter sind dem Einfluss der saisonalen Temperatur- und Kluftwasserwechsel ausgesetzt, was in der Datenanalyse immer entsprechend zu berücksichtigen ist (6b).

Mit präzisen Messungen ist es heute möglich, auf der Zeitachse drei verschiedene Zeitbereiche zu bestimmen, was ein gezieltes Vorgehen in der Massnahmenplanung und -Umsetzung zulässt. Der in Fig. 9a dargestellte Entscheidungsflowchart basiert auf

Fig. 9b: Beispiele verschiedener Verschiebungscharakteristiken von über ca. ein oder mehrere Jahre gemessener, oberflächlicher Jointmeter. 1) «Linear plastisch» (Val da Rein, Felskubatur ~ 1'000 m³); 2) «linear plastisch», wo der Einfluss der Schneeschmelze durch einen übermässigen Anstieg von J1 erkennbar ist (blaue Pfeile; Grüne Brücke, Felskubatur ~ 700 m³ [22]); 3) «progressiv plastisch», wo ab 2010 gegen den Absturzzeitpunkt vom 15.05.2012 hin Niederschläge und Schneeschmelze Bewegungsschübe zu bewirken vermochten, davor hingegen nicht oder kaum (Preonzo, Felskubatur ~ 210'000 m³ [24, 18]; Diagramm neu digitalisiert).

Erfahrungen, die in den letzten 25 Jahren an vielen Felsobjekten gemacht werden konnten, die sich auf verschiedenen Positionen der Zeitachse befanden (Fig. 9b). Der Flowchart basiert auf den entlang der Zeitachse auftretenden Verschiebungscharakteristiken, die anhand von präzisen, kontinuierlichen Messungen bestimmt werden können (Fig. 8).

Können beispielsweise im Zuge einer messtechnischen Überwachung einer kritischen Felsformation mit oberflächlich versetzten Jointmetern festgestellte Verschiebungszunahmen mit den Temperaturwechsel, den Niederschlägen oder der Schneeschmelze korreliert werden, so weiss man, dass es sich um den üblichen Entfestigungsprozess in der Ablösezone handelt, und dass keine ausserordentliche Gefährdung vorliegt (Normalfall). Wesentliche Verschiebungszunahmen die sich nicht mit diesen Einwirkungen korrelieren lassen, müssen eine andere Ursache haben und erfordern innerhalb der Überwachung eine erhöhte Aufmerksamkeit (aussergewöhnlicher Fall).

7 Wahl geeigneter Massnahmen

In der Tabelle 9 sind Massnahmen aufgeführt, die sich bei kritischen Sturzgefährdungen in der geeigneten Kombination bewährt haben. Der Geologe ist primär in den Massnahmenbereichen 7a bis 7b und fallweise 7d als Fachperson gefragt, wobei er sich im Bereich 7d vorwiegend konzeptionell einbringt.

7a) Die messtechnische Überwachung ist wahrscheinlich eine der heute am besten eingespielten Massnahmen, da sie einerseits institutionell stark propagiert wird und es anderseits in einem auf diesem Gebiet wachsenden Markt viele kommerzielle Anbieter gibt. Wenn die in den vorgängigen Abschnitten genannten, massgebenden Kriterien der Vorgehensweisen erfüllt sind, wird die Überwachung zu einem sehr effizienten Mittel. Sie ist das Nervensystem jedes Gefahrenmanagements. Eine periodisch vertiefte Auswertung durch den Geologen ist die Voraussetzung für deren erfolgreiche Anwendung. Dies wird in der Praxis aus organisatorischen, zeitlichen oder aus Kostengründen oft vernachlässigt. Hier handelt es sich um eine falsche Kosten/Nutzenoptik.

7b) Die SOMA haben sich heute in kritischen Situationen als wichtiges Führungselement durchgesetzt. Dasselbe gilt für die organisatorischen Massnahmen, die bei grossen Gefährdungen durch die Polizei, die kommunalen und kantonalen Führungsstäbe, unterstützt von Zivilschutz und Militär, in unserer Gesellschaft gut eingespielt sind (7c, [21]).

Die Bautätigkeiten gestalten sich je nach den lokalen Gegebenheiten fallweise verschieden und werden meist über Behördenvertreter planerisch und ausführungsmässig in Auftrag gegeben (7d). Ein spezielles Augenmerk gilt es den häufig diskutierten, baulichen Massnahmen einer Gebirgsentwässerung zu schenken. Grosse Sturzprozesse

Typ	Frage	wesentliche Kriterien
8.1a	Wo sind wir auf der Zeitachse?	progressive Verschiebungszunahme
8.1b	Sind die Daten und ist die Vorhersagemethode geeignet?	absolute oder relative Verschiebungsmessung ausreichender Genauigkeit und Messdauer, Redundanzen
8.1c	Ist die Voraussetzung für eine Zeitpunktbestimmung gegeben?	eine Verlangsamung der Sturzmasse ist kaum mehr möglich
8.1d	Vertrauensstufe der Ereignisvorhersage? (Angabe in 3 Stufen)	1: wahrscheinlich; 2: sehr wahrscheinlich; 3: bestimmbar

Tab. 10: Für eine zeitliche Vorhersage eines Sturzereignisses zu beantwortende Fragen.

können nur im Ausnahmefall nachhaltig und wirtschaftlich durch Entwässerungsmassnahmen verhindert oder verzögert werden. Wenn der durch Niederschläge und Schneeschmelze veränderliche Kluftwasserdruck eindeutig als massgebende Einwirkung einer progressiven Felsentfestigung festgestellt werden kann, befindet man sich auf der Zeitachse meist bereits in Nähe des kommenden Absturzereignisses. Dies war in Preonzo der Fall, wo die Verschiebungen in den Jahren 2002 bis 2010 nicht oder nur wenig auf die Niederschläge und die Schneeschmelze reagierten, ab 2010 bis zum Sturzereignis im Mai 2012 hingegen verstärkt (Fig. 9b3). So hätten beispielsweise Entwässerungsmassnahmen nach 2010 das Sturzereignis vielleicht etwas verzögern, jedoch nicht aufhalten können (gravitativ gesteuerter Prozess).

Nennenswerte Chancen der Entwässerung bestehen unter gewissen Voraussetzungen bei ausgedehnten Gleitprozessen (Abschnitt 4.3.1). Die Hauptschwierigkeit liegt bei meist hohen Kosten in der Abschätzung der Wirksamkeit solcher Massnahmen. Wenn mit den oft aus der Tiefe vorgenommenen Entlastungsbohrungen die Verschiebungsaktivität nicht rasch auf ein Minimum reduziert werden kann, sind die Wirksamkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die Lebensdauer der Entwässerungsmassnahme massiv reduziert bis unwirksam, da sie laufend wieder zerstört werden.

8 Vorhersage von Sturzereignissen

Die Vorhersage des Zeitpunktes eines Ereignisses bringt allen Verantwortlichen den entscheidenden Vorteil, dass sie agieren können und nur auf unvorhergesehene Entwicklungen des erwarteten Ereignisses reagieren müssen. Dadurch kann im Regelfall ein wesentlicher Teil des potenziellen Schadens abgewendet werden. Neben der zeitlichen Vorhersage soll auch das Sturzvolumen, die Ausdehnung der Ablagerungen und der erwartete Ablauf eines Sturzprozesses abgeschätzt bzw. angegeben werden (ein einmaliges Ereignis, portionenweise, Abbrüche über längere Zeiträume). Allfällige Verkettungen zu Folgeprozessen haben ebenso eine grosse Bedeutung und sind abzuklären und zu benennen.

8.1 Zeitliche Vorhersage

In der Tabelle 10 sind wesentliche Fragen aufgeführt, die zu beantworten sind, damit die Chance einer erfolgreichen, zeitlichen Vorhersage eines Sturzereignisses hochgehalten werden kann.

8.1a) Eine progressive Zunahme von gemessenen Verschiebungen kann zu irgendeinem Zeitpunkt, d.h. auch wenn erst eine kurze Datenmessreihe über die Instabilität vorliegt, festgestellt werden. In einem solchen Fall ist es sehr schwierig, kurzfristig eine erfolgsversprechende Absturzprognose zu erstellen, da in der Regel die für eine Prognose entscheidende Frage 8.1c kaum zu beantworten ist. Dann kann maximal die Vertrauensstufe 1 angegeben werden. Zudem ist zu beachten, dass progressive Zunahmen temperatur- und kluftwasserbedingt nur kurzfristig auftreten können (Abschnitte 2.2, 2.3).

8.1b) Für eine geeignete Vorhersagemethode sind präzise, absolute oder relative Verschiebungsmessungen 4.6a bis 4.6c, gemäss Abschnitt 4.6, von mindestens wenigen mm Genauigkeit erforderlich. Messdaten, die einer Interpretation bedürfen wie Radar oder Laser, sind hierfür kaum geeignet (4.6d, 4.6f). Da die Verschiebungen in der Ablösezone 3a am grössten sind, reagieren Daten aus dieser Zone am empfindlichsten und sind für die Verwendung von Sturzvorhersagen im Regelfall besonders gut geeignet.

8.1c) Die Darstellung der Verschiebungen im Diagramm der inversen Geschwindigkeit gegen die Zeit hat sich für die Bestimmung des Ereigniszeitpunkts bewährt (Fig. 11,

[32]). Der angegebene Zeitpunkt ist erst dann vertrauenswürdig, wenn sicher ist, dass in der Sturzmasse keine nennenswerte Verlangsamung der Geschwindigkeiten mehr möglich ist. Die Hauptschwierigkeit liegt im Wesentlichen darin, den «point of no return» feststellen zu können. Generell gilt, je grösser und träger die Absturzmasse, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ab einer gewissen Geschwindigkeit die verbleibenden Rückhaltekräfte noch eine Verlangsamung bewirken können. Die kritischen Geschwindigkeiten absturzgefährdeter Felsmassen sind je nach der Felsdisposition und der Grösse des Sturzvolumens verschieden und kaum bekannt. Es beruht auf der Erfahrung des Geologen, diesen Zeitpunkt des «point of no return» zu finden. Hierfür ist eine längere, intensive Beobachtung der Verschiebungsentwicklung, deren Verhalten zu den verschiedenen Einwirkungen, der Veränderung der felsmechanischen Randbedingungen sowie übriger Phänomene, wie auftretende Sturzereignisse, etc., erforderlich. Wer meint, er könne rasch die Daten in ein Diagramm plotten, um den Zeitpunkt festlegen zu können, wird kaum erfolgreich sein. In Preonzo war anhand der Verschiebungs-/Zeitkurve ab Ende April klar, dass der «point of no return» überschritten war [24].

8.1d) Das Bekanntgeben eines voraussichtlichen Ereigniszeitpunktes ist immer heikel und muss gut überlegt sein. Wie in diesem Artikel erläutert ist die Thematik zu komplex, als dass es eine Gewähr für erfolgreiche, zeitliche Vorhersagen gibt. Erweisen sich zeitliche Vorhersagen als unzutreffend, läuft man die Gefahr, dass im Wiederholungsfall diese nicht mehr ernst genommen werden und die betroffenen Personen den Anweisungen der Verantwortlichen nicht mehr Folge leisten. Mit der Angabe von drei Vertrauensstufen 1-3 können beispielsweise die organisatorischen Massnahmen 7c graduell vorbereitet und bei der höchsten Stufe 3 die maximalen angeordnet werden. Auf eine zeitliche Vorhersage unterhalb der Vertrauensstufe 1, «Ereignis wahrscheinlich», soll im Regelfall verzichtet werden.

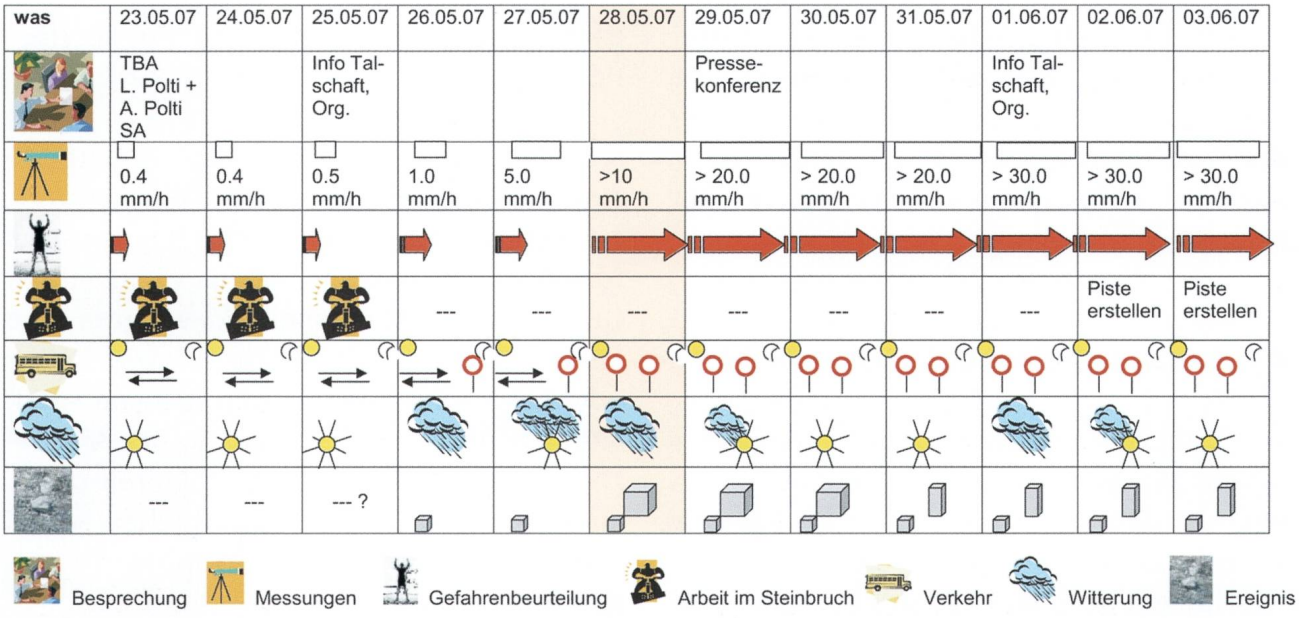


Fig. 10: Die 5 Tage im Voraus gemachte Ereignisvorhersage ermöglichte allen Beteiligten innerhalb des Gefahrenmanagements primär zu agieren. Damit konnte das Schadenpotenzial erheblich reduziert werden. Bis 2 Tage vor Beginn des Hauptsturzereignisses von insgesamt 200'000 m³ konnten im Steinbruch Arvigo und bei den Infrastrukturbauten Schutzvorkehrungen vorgenommen werden. Zwei Tage vorher wurde die Calancastrasse über Nacht und ab dem 28.05.2007 auch tagsüber gesperrt. Bereits eine Woche nach Ereignisbeginn wurde die Strasse über eine Umfahrung dem Verkehr wieder freigegeben [25, 30].

8.2 Weiterführende Vorhersage

Eine räumliche Vorhersage eines Ereignisses setzen detaillierte Abklärungen der Sturzgefährdung voraus (Abschnitt 5), anhand der die massgebenden Entfestigungsprozesse und die Kinematik erfasst werden konnten. Dann kann das erwartete Sturzvolumen und die Art des Ereignishergangs relativ gut zutreffend prognostiziert werden.

Die Ausdehnung der Ablagerung der Sturzmasse zu prognostizieren ist erheblich schwieriger, wenn beispielsweise nicht bereits stumme Zeugen von Schuttkegeln ähnlicher Sturzvolumina in der Umgebung vorliegen. Modellierungen können grundsätzlich dabei helfen. Verglichen zu Sturzmodellierungen von Einzelblöcken sind jene von Fliessprozessen noch nicht auf demselben Niveau entwickelt und aufgrund einer anderen Prozessdynamik sowie schwierig abschätzbarer Randbedingungen erheblich komplexer. Sie haben heute wahrscheinlich erst den Stand von groben Annäherungen erreicht, was es innerhalb des Gefahrenmanagements stets zu berücksichtigen gilt.

Ein weiteres, schwieriges Kapitel ist die Frage nach möglichen und wahrscheinlichen Prozessverkettungen, d.h. was für weitere Folgeprozesse das Sturzereignis auslösen kann (Murgang, Flutwelle, etc.). Auch aus dieser Optik kommt dem Bedürfnis einer zeitlichen Ereignisvorhersage eine grosse Bedeutung zu. Bei einer zeitlichen Vorhersage kann man einerseits die Randbedingungen, wie Schneelage, Niederschläge, Sturm und die Auswirkungen wahrscheinlicher Prozessverkettungen, besser beurteilen. Anderseits können bei schlecht einschätzbaren Risiken die Schutz- oder Ausweichmassnahmen auf diesen Zeitpunkt hin zwecks Schadensminimierung vorsichtshalber umfassender gestaltet werden.

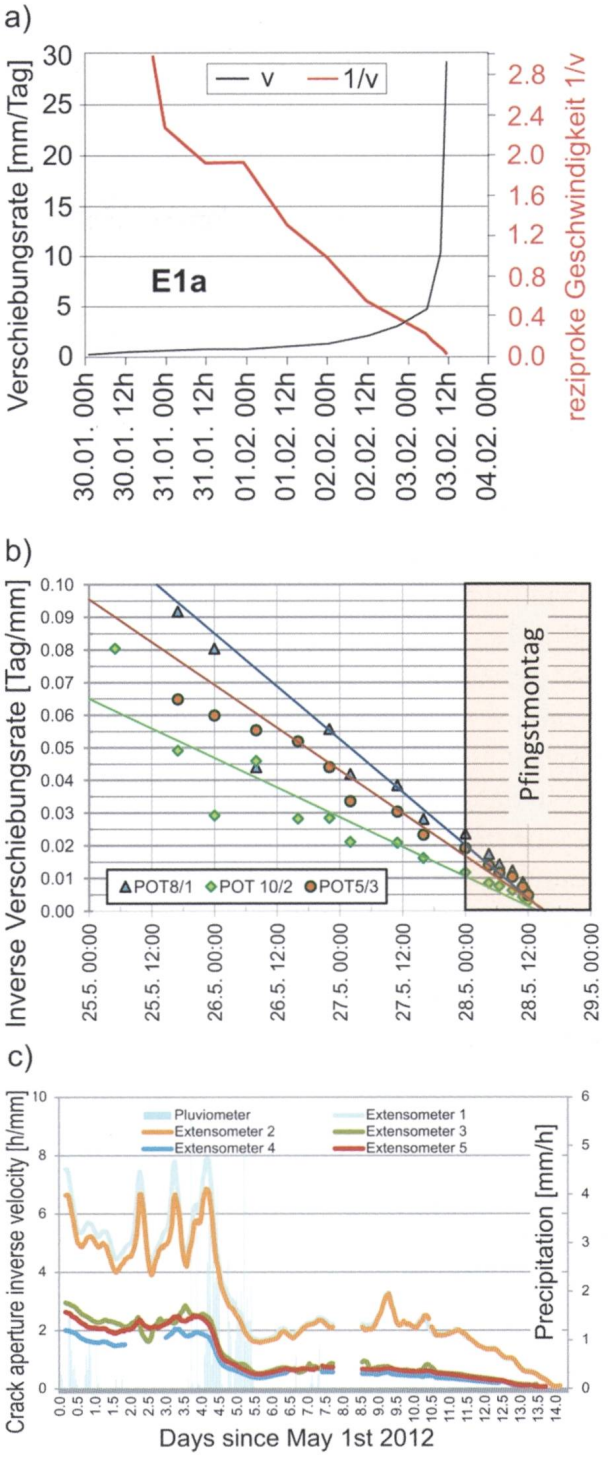


Fig. 11: Eine laufende Auswertung von präzisen, kontinuierlichen Verschiebungsmessungen, kombiniert mit der notwendigen Erfahrung des Geologen ermöglicht die zeitliche Vorhersage von Sturzereignissen. a) Auf die Stunde genauer Ereigniszeitpunkt im Diagramm inverse Verschiebungsrate gegen die Zeit von in Bohrlöchern installierten Extensometern (E1a), Sturzereignis Val d'Infern von 20'000 m³ [6]. b) Auf den Tag genaue Vorhersage des Ereignisses beim Steinbruch Arvigo von 200'000 m³ (Regressionsgeraden [25]). c) Auf 1 bis 2 Tage genaue Vorhersage des Ereignisses von Preonzo von 210'000 m³ [24]. Da jede Felssturzdisposition naturbedingt ein Unikat darstellt, gibt es keine Gewähr für eine präzise, zeitliche Vorhersage.

8.3 Erfolgreiche Vorhersage

Erfolgreiche Vorhersagen von Sturzereignissen ermöglichen es, katastrophenähnliche Ereignisse einigermassen kontrolliert zu bewältigen. Dies indem sich die zivilisatorische und behördliche Umgebung mit entsprechenden Massnahmen auf ein solches Ereignis einstellen und entsprechende Vorbereitungen treffen kann (Fig. 10). Sensible, materielle Gegenstände können vorgängig geschützt oder in Sicherheit gebracht werden; der Zugang von Personen zu gefährdeten Einrichtungen und Örtlichkeiten kann wirkungsvoll verhindert und angeordnete Verbote auch durchgesetzt werden; eine zeitgerechte Kommunikation kann vorgenommen und das Risikomanagement gezielt vorbereitet werden. Nur schon das Verhindern, dass im Ereignisfall nicht Rettungskräfte für die Vermisstensuche in ein akut gefährdetes Gebiet geschickt werden müssen, ist ein Erfolg.
Heute verfügt man grundsätzlich über die technischen Mittel und das Knowhow, um die Erfolgschance einer Vorhersage von grossen Sturzereignissen hochzuhalten. So konnte der zweite Bergsturz von Randa vom 09.05.1991 anhand, über Spalten ausgeführter Messungen vorangekündigt werden. Die beiden Felsstürze von Preonzo von 2002 (150'000 m^3) und vom 15. Mai 2012 (210'000 m^3, [24]), sowie andernorts weitere, kleinere konnten auf 1 bis 2 Tage genau vorausgesagt werden (Fig. 11). Das heisst aber nicht, dass dies stets gewährleistet werden kann. Jedes Sturzpotenzial ist aus geologischer, felsmechanischer und geometrischer Sicht ein Unikat mit individuellen Gegebenheiten, die detailliert eruiert und verstanden werden müssen.

Wenn die in den Abschnitten 4 bis 7 genannten Aspekte sorgfältig abgewogen und ausgeführt werden, bestehen grosse Chancen für eine erfolgreiche Ereignisvorhersage. Unter den beteiligten Fachleuten spielt hierbei der Geologe die zentrale Rolle. Neben einer genauen, geologischen, felsmechanischen und kinematischen Analyse sind kontinuierliche Deformationsmessungen von hoher Genauigkeit unabdingbar. Die Installation eines zweckmässigen Messsystems ist in den meist exponierten Lokalitäten und unter oft ungünstigen Randbedingungen schwierig. Es kann dabei nicht darum gehen, das Unmögliche zu versuchen, sondern entschlossen und energisch das für die Zielsetzung geeignet Mögliche zu finden und konsequent umzusetzen. Während eines Vierteljahrhunderts engagierter Berufstätigkeit haben wir nach einer intensiven Abklärung und Lösungssuche auch bei noch so schwierigen Randbedingungen schlussendlich stets eine für den vorgesehenen Zweck geeignete Instrumentierung gefunden und diese mit Erfolg zur Anwendung gebracht. Es kann nicht von der Hand gewiesen werden, dass für ein gutes Gelingen oft auch die notwendige Portion Glück erforderlich ist.

Ein exemplarisches Beispiel einer erfolgreichen Vorhersage bildet der Felssturz von 20'000 m^3 im Val d'Infern, der die zwei Tunnels verbindende, 30 m lange Brücke der Calancastrasse zerstörte. Anhand der 10-jährigen, stufenweise mit Instrumenten ergänzten, messtechnischen Überwachung einer stark entfestigen Felsmasse konnte der richtige Zeitpunkt gewählt werden, der die Planung und den Bau eines 300 m langen Umfahrungstunnels innert einer extrem kurzen Zweijahresfrist ermöglichte [30]. Dank dieser rechtzeitigen, baulichen Massnahme konnte bei dem ein halbes Jahr nach dessen Eröffnung erfolgten Felssturzes erreicht werden, dass die einzige Zufahrtsstrasse nicht über Monate unterbrochen wurde. Dank einer periodisch intensiven Auswertung der Messdaten konnte nicht nur das Sturzereignis auf die Stunde genau vorhergesagt werden, sondern es konnten auch wichtige Erkenntnisse über die Entfestigungsprozesse der Sturzmasse gewonnen werden [2].

Eine ebenfalls aufgrund von Verschiebungsmessdaten eine Woche im Voraus auf den Tag

genau vorgenommene, zeitliche und räumliche Vorhersage eines insgesamt 400'000 m³ grossen Sturzereignisses beim Steinbruch Arvigo erlaubte ein in jeder Hinsicht kontrolliertes Gefahrenmanagement, welches Personenschäden verhinderte, die Sachschäden durch entsprechende Vorbereitungsmassnahmen wesentlich reduzierte und innert Wochenfrist eine Wiederinbetriebnahme der Calancastrasse ermöglichte (Fig. 10).

9 Gefahrenmanagement des Geologen

Bei kleinen Sturzereignissen bestreitet der Geologe im Regelfall den Grossteil des Risikomanagements und übernimmt dabei die Gesamtleitung (Norm SIA 106). In vielen Fällen kommt der Geologe erst nach einem erfolgten Sturzereignis auf den Platz, weil das Ereignis unerwartet eintrat. Da Felssturzereignisse selten sind, begleiten die meisten Geologen während ihrer beruflichen Tätigkeit höchstens vereinzelt Felssturzdispositionen bis zum Absturz. Viele Geologen können daher nicht auf die Erfahrung eines Gefahrenmanagements zurückgreifen.

Wo eine sehr grosse Gefährdung oder ein sehr hohes Schadenpotential von mehreren 10er Mio. CHF vorliegt, lohnt es sich, wenn dem in solchen Situationen meist schon lange vor einem Ereignis beauftragten Geologen ein Expertenteam von ausgewiesenen und in diesem Prozess praxiserfahrenen Geologen zur Seite gestellt wird. Dies soll spätestens dann erfolgen, wenn anhand von Messdaten die Verschiebungscharakteristik C, «kritisch», festgestellt wird (Abschnitt 6). Noch besser ist, das Expertenteam bereits eine Phase früher, d.h. bei der Verschiebungscharakteristik B, «linear plastisch», erstmals punktuell einzusetzen. Da die Wahl, die Installation und der Einsatz von kontinuierlichen Messeinrichtungen meist schwierig und mit nennenswerten Kosten verbunden sind, ist oft eine konsequente Beharrlichkeit und ein erhöhtes Durchsetzungsvermögen gefordert, um bei Organisationen, welche die Kosten solcher Instrumentierungen kaum im Jahresbudget haben, diese veranlassen und realisieren zu können.

In der Phase der «Beurteilung von Sturzgefährdungen» können alle notwendigen Beurteilungselemente von einem erfahrenen Geologenteam kritisch hinterfragt, und gegebenenfalls entsprechende Ergänzungen noch rechtzeitig vorgenommen werden (Abschnitt 6). Die Praxiserfahrung zeigt, dass bis zum Eintritt eines Sturzereignisses im Regelfall stets eine längere Zeit zur Verfügung steht, als was die involvierten Fachleute allgemein erwarten. Dies da Entfestigungsprozesse grosser, potenzieller Sturzmassen grundsätzlich über lange Zeiträume von meist mehreren Generationen ablaufen. Dies birgt auch Gefahren. Es ist schwierig über eine lange Zeit die erforderliche Aufmerksamkeit beizubehalten, um kritische Veränderungen rechtzeitig erkennen und die entsprechenden Massnahmen einleiten zu können. So wurde in Randa vor dem zweiten Bergsturz vom 09.05.1991 mit den inzwischen kontinuierlich messenden Jointmetern erst sehr kurzfristig am 07.05. eine exponentielle Verschiebungszunahme festgestellt [26]. Wäre man nicht durch den ersten Bergsturz vom 18.04. vorgewarnt gewesen, was eine entsprechende Aufmerksamkeit für die weitere Verschiebungsentwicklung bewirkte, so hätte sich der Bergsturz vom 09.05. wahrscheinlich völlig unerwartet ereignet.

Der frühzeitige Einsatz eines sorgfältig gewählten Expertenteams erhöht die Chance für die in diesem Artikel ausgeführte, effiziente und zielführende Problemerfassung und Ereignisbewältigung von Felssturzdispositionen eines ausserordentlichen Gefahren- oder Schadenpotentials ganz wesentlich.

Literaturverzeichnis

[1] Phillips M. et.al. 2016: Rock slope failure in a recently degalciated permafrost rock wall at Piz Kesch (Eastern Swiss Alps), February 2014, Earth Surf. Process. Landforms (2016).

[2] Krähenbühl R. 2004: Temperatur und Kluftwasser als Ursache von Felssturz, Bull. angew. Geol. 9/1.

[3] Gischig V. et.al. 2007: Thermo-mechanical forcing of deep rock slope deformation - Part II: the Randa rock slope instability, Geophys. Rs. 2011JF002007.

[4] Moore J.R. et. al. 2011: Air circulation in deep fractures and the temperature field of an alpine rock slope, Earth Surface Processes and Landforms, 36(15), 1985-1996.

[5] Dr. Vollenweider AG 2006: Deformationsmessungen Rutschung Ricaldei, Prada, Bericht 720/26 vom 06.12.2006.

[6] Krähenbühl, R. 2006: Der Felssturz, der sich auf die Stunde genau ankündigte, Bull. angew. Geol. 11/1.

[7] Amann, F. 2006: Grosshangbewegung Cuolm da Vi (Graubünden Schweiz) Geologisch-geotechnische Befunde und numerische Untersuchungen zur Klärung des Phänomens, Dissertation der naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg.

[8] Fossati, D.A. 2008: The deep seated gravitational slope deformation of Landarenca, a geological-geotechnical analyses, Master Thesis Septemer 2008.

[9] Moser, M. 1994: Geotechnics of large scale slope movements («Talzuschübe») in Alpine Regions, 7th international IAEG congress. 1533-1542, Rotterdam.

[10] Krähenbühl, R. & Nänni, C. 2017: Ist das Dorf Brienz-Brinzauls Bergsturz gefährdet?, Swiss Bulletin, Vol. 22/2.

[11] Hudson, J.A. & Harrison, J.P. 1997: Engineering rock mechanics. Elsevier Science Ltd, UK, 444 pp.

[12] Zangerl, C. et.al. 2003: Multidisziplinäre Prozessanalyse instabiler Hänge, Geoforum Umhausen, Tagungsband III (2001-2004).

[13] Paraskevopoulou, C. et. al. 2017: Time-dependent behaviour of brittle rocks based on static load laboratory tests, Geotech Geol Eng, DOI 10.1007/s10706-017-0331-8.

[14] BauGrundRisk GmbH 2007: Überwachungsplan Felssturzgefährdung Galerie Gorda Süd, Mesocco, Geologischer Bericht 071124-1 vom 14.12.2007.

[15] Gruner, U. 2004: Felssturzgefahr Chapf-Blattenalp (Innertkirchen BE), Bull. angew. Geol. 5/1 2000.

[16] Gruner, U. 2004: Klima und Sturzereignisse in Vergangenheit und Zukunft, Bull. angew. Geol. 9/2 2004.

[17] De Preux, A. 2014: Charakterisation of the large rock slope instability at Pizzo Cengalo (Switzerland): roles of structural predispoition and permafrost on stability, Master thesis 2014

[18] Signer, A. 2010: Structural and kinematic analysis of the Roscioro rock slide, Preonzo, Switzerland, Masterarbeit ETHZ.

[19] Leu, W., Csikos, G. adnr exploration 2005: Einsatzmöglichkeiten der Tieffrequenzseismographie zur Beurteilung der Felsentfestigungssituation im spröden Gebirge, A13c Nationalstrasse, Felssturz Galerie Gorda Süd, 741 Calancastrasse, Felssturz Val d'Infern.

[20] BABS 2015: Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren.

[21] Ratgeb, Chr. & Bühler M. 2018: Bergsturz am Piz Cengalo, Allgemeine Schweizerische Militärzeitschrift, Nr. 01/02, Jan./Feb. 2018, 184. Jahrgang.

[22] BauGrundRisk GmbH 2018: Überwachung Felssporn Widerlager Süd, Grüne Brücke, Splügen, 6. Zwischenbericht Telejointmeter Messungen, 1802234-1 vom 29.03.2018.

[23] Willenberg, H. et. al. 2009: Hazard assessement and runout analysis for an unstable rock slope above an industrial site in the Riviera vally, Switzerland, Landslides (2009), 6:(111-116), DOI 10.1007/s10346-009-0146-7.

[24] Löw, S. et. al. 2016: Monitoring and early warning of the Preonzo catastrophic rockslope failure, Landslides (2009), 6:(111-116), DOI 10.1007/s10346-016-0701-y.

[25] BauGrundRisk GmbH 2007: Felssturz Steinbruch Arvigo, 741 Calancastrasse, Geologischer Bericht vom 28.06.2007.

[26] Schindler C. et. al. 1993: Die Ereignisse vom 18. April und 9. Mai bei Randa, (VS), ein atypischer Bergsturz in Raten, Eclogae Geologicae Helvetiae, Vol. 86, No. 3, 1993, pp. 643-1095.

[27] Krähenbühl, R., & Donau, M. 2017: Der Tunnel dem sein Fels davon läuft, Geoforum Umhausen, Tagungsband 2017.

[28] BauGrundRisk GmbH 2018: Felssturzgefährdung Molina d'Dent, Buseno, 741 Calancastrasse, Zwischenbericht messtechnische Überwachung 1801261-1 vom 09.02.2018.

[29] Thuro, K. et. al. 2006: Der Bergsturz von Goldau 1806: was wissen wir 200 Jahre nach der Katastrophe, Bull. angew. Geol. 11/2, 2006.

[30] Krähenbühl, R., et. al. 2008: Felsstürze isolieren ein Tal zu Aussenwelt, Tiefbau Nr. 8, August 2008

[31] Gruner, U. 2006: Bergstürze und Klima in den Alpen - gibt es Zusammenhänge?, Bull. angew. Geol. 11/2, 2006

[32] Fukuzono T. 1985: A new method for predicting the failure time of a slope, In proceedings of the 4th international conference and field workshop on landslides, Tokyo, University press, p 145-150.

[33] Amann F. et. al. 2006: Kinematik und Bewegungsmechanismen der tiefgründigen Instabilität Cuolm da Vi (Graubünden, Schweiz), Bull. angew. Geol. Vol 11/2, 2006.

[34] Goodman R.E. 2013: Toppling - A Fundamental Failure Mode in Rock Mass and other Discontinuous Materials - Description, Analyses, and Case Histories, Mitteilung für Ingenieurgeologie und Geomechanik, Band 10, 6th Colloquium Rock Mechanics - Theory and Practice, Wien 2013.