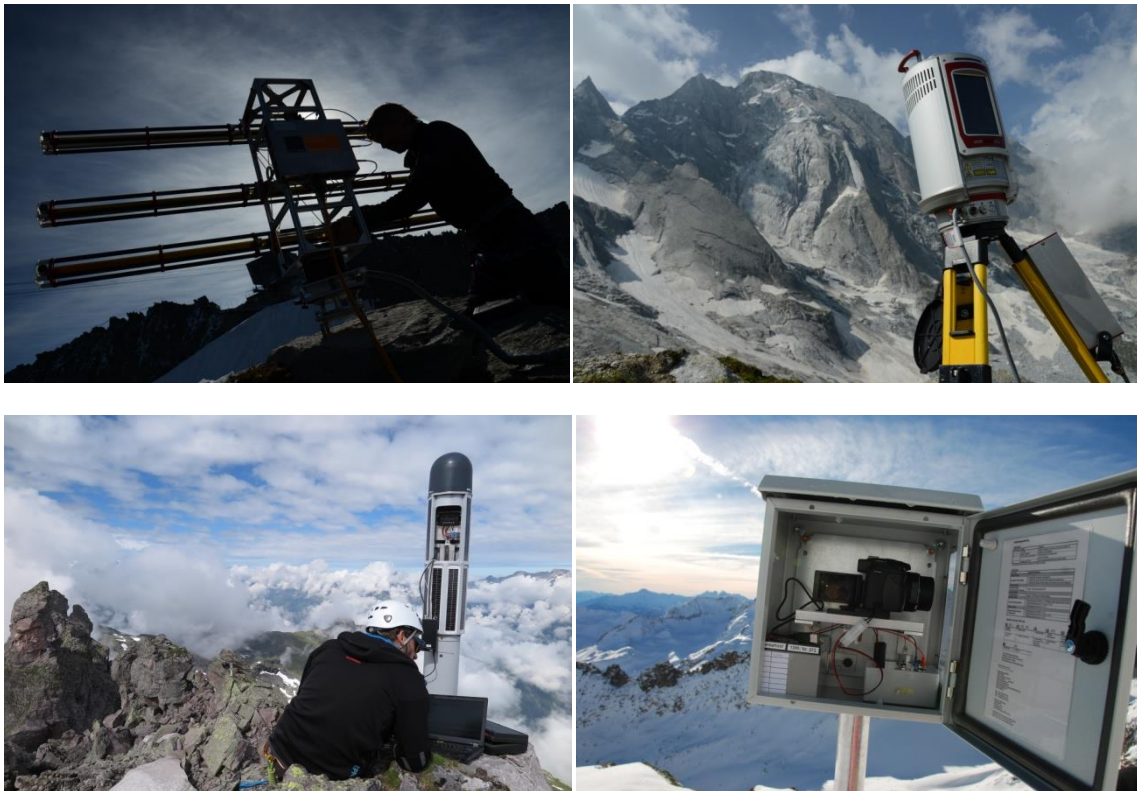


Hinweise für die Praxis zum Umgang mit Felsinstabilitäten im Permafrost



Erkenntnisse aus dem Arge Alp Projekt
,Einfluss von Permafrost auf Berg- und Felsstürze'



Überwachung von Felsbewegungen im Permafrost mit diversen Messgeräten

Robert Kenner und Marcia Phillips

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

Hinweise für die Praxis zum Umgang mit Felsinstabilitäten im Permafrost



Erkenntnisse aus dem Arge Alp Projekt

„Einfluss von Permafrost auf Berg- und Felsstürze“

- Projektfinanzierung:** Arge Alp
- Auftraggeber:** Andreas Huwiler, Amt für Wald und Naturgefahren Graubünden
- Berichterstattung:** Robert Kenner und Marcia Phillips, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
- Projektpartner:** Florian Amann (ETH Zürich)
Yves Bonanomi (Bonanomi AG)
Andrew Kos (Terrasense Switzerland)
Volkmar Mair (Amt für Geologie und Baustoffprüfung, Bozen I)
Marcia Phillips, Robert Kenner (SLF)



Amt für Wald und Naturgefahren
Uffizi da guaud e privels da la natira
Ufficio foreste e pericoli naturali



ETH zürich
Engineering Geology



terrasense GEOLOGICAL RISK PREVENTION



AUTONOME PROVINZ BOZEN SÜDTIROL
PROVINCIA AUTONOMA DI BOLZANO ALTO ADIGE
PROVINZIA AUTONOMA DE BULSAN SÜDTIROL

Inhaltsverzeichnis

1. Grundlegende Informationen für die Praxis	4
2. Messmethoden.....	5
3. Hinweise zum Umgang mit instabilen, hochalpinen Permafrost Felswänden.....	9
4. Permafrost in Felswänden und Klimawandel	12
5. Weiterführende Literatur	13

1. Grundlegende Informationen für die Praxis

Permafrost bezeichnet Boden oder Felswände, welche dauerhaft eine Temperatur unter 0°C aufweisen. Permafrost hat einen überwiegend stabilisierenden Effekt auf Felswände. Erwärmt er sich jedoch über -1.5°C oder taut auf, geht die stabilisierende Wirkung verloren. Felsstürze aus Permafrostregionen der Schweizer Alpen haben sich daher im Zuge des Klimawandels und der damit einhergehenden Permafrost Erwärmung in den letzten 1 bis 2 Dekaden gehäuft. Es ist auch mittelfristig mit einer weiterhin hohen Frequenz von Felsstürzen zu rechnen, dies auch aus bisher stabilen Felswänden. Ein Schwerpunkt der Felssturzaktivität liegt dabei an Hängen der Exposition West über Nord bis Ost und in Höhenbereichen zwischen 2600 und 3500 m. Dies entspricht den Gebieten mit Permafrost nahe 0°C welche am stärksten vom Klimawandel betroffen sind. Da in Südhängen die Strahlung einen hohen Einfluss auf die Energiebilanz hat, sind die Auswirkungen des Klimawandels dort weniger stark ausgeprägt. Mit einer weiteren Erwärmung ist davon auszugehen, dass die Felssturzaktivität zunehmend auch höher gelegene Wände erfasst.

Saisonal existiert eine Häufung von Felsstürzen in der zweiten Jahreshälfte. Kleinere Felsstürze bis ca. 100'000 m³ finden dabei meistens von Juli bis Oktober statt, weniger häufig auch später im Jahr (November, Dezember). Fels- und Bergstürze über 100'000 m³ finden recht gleichmässig über das ganze 2. Halbjahr verteilt statt und können auch mitten im Winter abgehen. Der Grund für diesen zeitlichen Unterschied liegt in der unterschiedlichen Anrisstiefe verschieden grosser Felsstürze. Die Sommerwärme braucht deutlich länger um die oft tiefen Anrissezonen grosser Felsstürze zu erreichen und den Permafrost dort zu erwärmen. Tiefergehende Analysen zum Einfluss von Permafrost und anderer Faktoren auf hochalpine Felsstürze finden sich im Abschlussbericht des Arge Alp Projekt ‚Einfluss von Permafrost auf Berg- und Felsstürze‘ (Kenner et al., 2017).

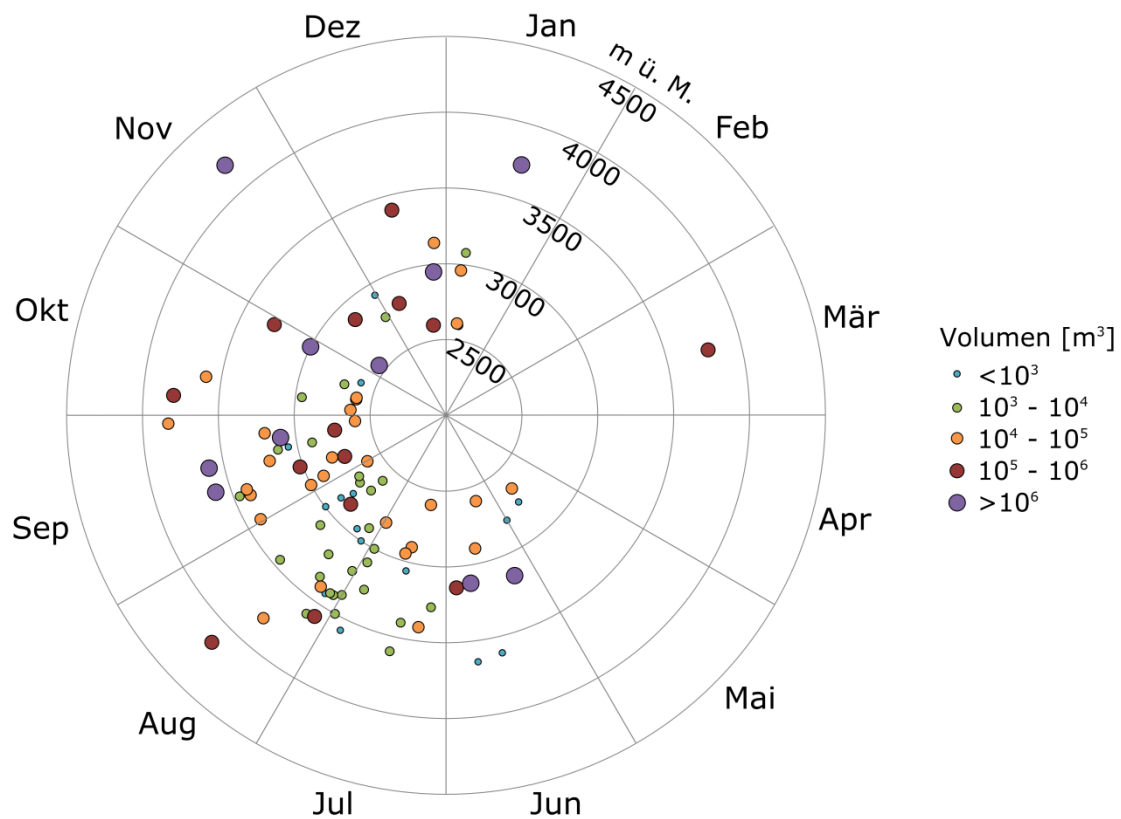


Abbildung 1: In der SLF Datenbank erfasste Felsstürze nach Jahreszeit, Volumen und Höhenlage (1714-2017). Es zeigt sich eine Häufung von kleineren Felssturzereignissen bis $100'000 \text{ m}^3$ Ende des Sommers und um etwa 3000 m Höhe, was zeitlich und räumlich den Bereichen mit warmem Permafrost entspricht. Grössere Felsstürze ereignen sich in allen Höhen und recht gleichmässig hauptsächlich über die zweite Jahreshälfte verteilt. Sie können auch im Winter auftreten (Daten: SLF, PERMOS, StorMe, Guardaval, Daten von Ravel & Deline (Mont Blanc Gebiet)).

2. Messmethoden

Instabile Felswände mit Gefährdungspotential fordern häufig eine Überwachung der Felsbewegungen. Eine Zusammenfassung der üblicherweise zur Geländeüberwachung eingesetzten geodätischen Messmethoden und ihrer Eigenschaften befindet sich in Tabelle 1. Für die Überwachung von Felswänden kommen insbesondere die Messmethoden Radarinterferometrie, terrestrisches Laser Scanning (TLS) und tachymetrische Punktmessungen in Frage. Ausserdem können lokale Deformationen zum Beispiel mittels Extensometern in Klüften und mittels Inklinometern und Glasfaser Deformationsketten in Bohrlöchern gemessen werden. Das Ausmass sowie Art und Zeitpunkt des Abgangs eines Felssturzes lassen sich einfach und kostengünstig über vor Ort installierte Kameras mit automatischer Datenübertragung erfassen. Temperaturmessungen in Bohrlöchern geben Aufschluss über die Existenz von Permafrost, die Mächtigkeit der Auftauschicht und allfällige Wasserflüsse in Felsklüften. Die Anwendung von in-situ GPS (GNSS) Empfängern in Felswänden kommen vor allem bei starken Langzeitbewegungen zum Einsatz.

In der Folge werden diese Messmethoden aufgegriffen und ihre Vor- und Nachteile, ihr Potential und ihre Limitierungen beschrieben:

Vorteile Radarinterferometrie:

- Es kann eine sehr hohe Genauigkeit im Millimeter Bereich erzielt werden.
- Es ist kein Zugang zum Messobjekt nötig
- Die Messungen sind wetterunabhängig
- Die Messreichweiten sind sehr hoch
- Die räumliche Abdeckung und Auflösung sind sehr hoch

Nachteile Radarinterferometrie:

- Felsbewegungen können nur in Messrichtung erfasst werden (1D)
- Die Georeferenzierung der Daten ist oft schwierig und erfordert zusätzlich ein genaues Geländemodell.
- Die Interpretation der Ergebnisse bleibt aufgrund der 1D Messung schwierig
- Es kann zu Abschattungen in komplexen Felswänden kommen
- Die Messausrüstung ist sperrig und schwer
- Die Messung ist Refraktionsanfällig

Vorteile terrestrisches Laserscanning (TLS):

- Die Messung liefert auf direktem Weg 3D Koordinaten der Geländeoberfläche
- Die Messung ist flächendeckend
- Es ist kein Zugang zum Messobjekt nötig
- Es können leicht 3D Bewegungsinformationen aus den Verschiebungen der Oberflächenstruktur abgeleitet werden.
- Im Scan referenzierte Bilder und der Reflektivitätscode jedes einzelnen Punktes liefern zusätzliche Informationen

Nachteile TLS:

- Wetterabhängigkeit
- Die Genauigkeit liegt im Zentimeter Bereich und damit tiefer als die aller anderen Messsysteme
- Fehlereinflüsse durch limitierte Gerätestabilität
- Es kann zu Abschattungen in komplexen Felswänden kommen
- Die Messung ist Refraktionsanfällig

Vorteile Tachymeter:

- Es werden direkte 3D Koordinaten gemessen
- Klar definierte Punkte können schnell erfasst werden
- Hohe Genauigkeit für Entfernungen unter 1000 m (Größenordnung mm)
- Bekanntes und bewährtes Genauigkeitsmanagement

Nachteile Tachymeter:

- Mindestens einmaliger Zugang zum Messobjekt nötig (Prisma Installation)
- Wetterabhängigkeit
- Es sind stabile Anschlusspunkte in der Umgebung nötig
- Die Messung ist Refraktionsanfällig

Vorteile in situ GNSS:

- Hohe Genauigkeit (Millimeter)
- Relativ hohe zeitliche Auflösung (Abhängig von der Bewegungsgeschwindigkeit)
- Wetterunabhängigkeit
- Geringer Energiebedarf
- Gute Langzeitstabilität
- Es werden direkt 3D Koordinaten im globalen Referenzrahmen gemessen
- Es ist keine Sichtverbindung zwischen den Messpunkten nötig

Nachteile in situ GNSS:

- Es kann nur ein Punkt pro Geräteaufbau gemessen werden
- Der Zugang zum Messpunkt ist nötig für Installations- und Unterhaltsarbeiten
- In Felswänden fehlt oft ein möglichst freies Himmelsfeld um eine ausreichende Abdeckung mit Satelliten in einer günstigen Konstellation zu erreichen.
- Fehlereinflüsse (Atmosphäre, Mehrwegeeffekte etc.) sind schwer von Bewegungseinflüssen zu unterscheiden.

Tabelle 1: Geodätische Messsysteme und ihre Eigenschaften

	GNSS	Tachymeter	Terrestrisches Laserscanning	Luftgestütztes Laserscanning	Luftgestützte Photo-grammetrie	Terrestrisches Radar	Satelliten-gestütztes SAR
Plattform	Terrestrisch: Am Objekt	Terrestrisch: Am Objekt	Terrestrisch: Standort nahe am Objekt	Fernerkundung: Flugzeug/ Helikopter	Fernerkundung: Flugzeug/ Drohne	Terrestrisch: Standort nahe am Objekt	Fernerkundung: Satellit
Höchste erzielbare räumliche Auflösung	Einzelpunkt Messung	Einzelpunkt Messung	wenige cm	> 50cm	> 25cm	> 1 m @ 1 km	> 1m
Räumliche Abdeckung	Lokal	Lokal	Lokal	Regional	Überregional	Lokal	Überregional
Dimensionalität	Direkt 3D Punkt- koordinaten	Direkt 3D Punkt- koordinaten	Direkt 3D Oberflächen- koordinaten	Direkt 3D Oberflächen- koordinaten	Indirekt 3D Oberflächen- koordinaten	Direkt 1D Koordinaten Differenzen	Direkt 1D Koordinaten Differenzen
Höchste erzielbare Genauigkeit	>mm	mm	>cm	dm	sub-dm	mm	mm
Bildinformation	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Referenzierte Bilder	Nicht verfügbar	Multiband Bild Informationen	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
Natürliche Strahlung	Unabhängig	Unabhängig	Unabhängig	Unabhängig	Abhängig	Unabhängig	Unabhängig
Topographische Effekte	Satelliten Abschattungen	Oberflächen Abschattungen	Oberflächen Abschattungen	Kein Einfluss	In steilem Terrain	Oberflächen Abschattungen und Layover	Oberflächen Abschattungen und Layover
Vegetation	Kein Einfluss	Kein Einfluss	Einfluss	Einfluss	Einfluss	Einfluss	Einfluss
Aufwand (Dauer der Datenaufnahme, Logistik, Kosten)	Hoch, Manuelle Messung an jedem Punkt	Hoch, Manuelle Messung an jedem Punkt	Mässig, Fernerkundung über grosse Distanzen, Zugang nötig	Hoch, Lange Flugzeiten, Teuer	Mässig, Effiziente Flächen- abdeckung, Teuer	Mässig, Schwere Ausrüstung	Niedrig, Automatischer Betrieb, Effizient, Angemessene Preise

3. Hinweise zum Umgang mit instabilen, hochalpinen Permafrost Felswänden

Es gibt im Wesentlichen zwei Praxisfälle in denen Hanginstabilitäten in hochalpinen Felswänden relevant werden. Dies ist einerseits die Gefahr von Felsstürzen, welche darunterliegende Siedlungsgebiete, Verkehrswege, Stauseen oder andere Infrastrukturen gefährden. Andererseits spielt die Stabilität von Felswänden bei Bauvorhaben eine wesentliche Rolle. Häufig handelt es sich dabei um sicherheitsrelevante Bauten wie zum Beispiel Lawinenverbauungen (Margreth, 2007) oder Seilbahnmasten. In beiden Fällen sollte ein Überwachungsplan für die betroffenen Geländebereiche ausgearbeitet werden, welcher klar Grenzwerte für potentielle Bewegungsraten definiert, deren Erreichen in der Folge weitere Sicherheitsmassnahmen auslösen würde.

- 1) **Felssturzscenario:** Instabilitäten einer Felswand werden in den allermeisten Fällen erst durch ein initiales Ereignis deutlich. Dies kann vermehrter Stein- und Blockschlag sein, oft ging aber bereits ein Felssturzereignis voraus. Solche Vorboten können mit automatischen Kameras erfasst werden. Die Identifizierung von zukünftigen Felsstürzen ist schwierig und am ehesten durch regelmässige satellitengestützte Radarinterferometrie zu realisieren. Diese Messmethode ist die einzige, welche grossflächig (d.h. für administrative räumliche Skalen) Veränderungen im Millimeterbereich auflösen kann. Irreversible Bewegungen einer Felswand können so bereits frühzeitig erkannt werden. Allerdings wird auch diese Methode aufgrund zahlreicher Limitierungen wie z.B. Abschattungen, Signalüberlappungen, Radarbildverkürzungen oder zeitlicher Dekorrelation des Radarsignals nicht alle potentiell relevanten Geländebereiche erfassen können (Kenner et al., 2016).

Besteht Verdacht auf eine Felsinstabilität, ist das in Abb. 2 zusammengefasste Vorgehen empfohlen. Die wichtigste zu beschaffende Information ist: Wie hoch sind die Bewegungsraten und gibt es wohlmöglich eine weitere Beschleunigung? Dabei ist auf die Grössen- und Zeitskalen zu achten: Liegen keine weiteren Kenntnisse vor, ist zu Beginn terrestrische Radarinterferometrie zu wählen. Es werden zu Beginn permanente Messungen empfohlen, mindestens aber Wiederholungsmessungen im Takt von Stunden bis wenigen Tagen. Werden innerhalb dieser Zeiträume Bewegungen gemessen, sind dies grosse Bewegungen (Grössenordnung Millimeter). Kleine Bewegungen sind mit keiner Fernerkundungsmethode in so kurzer Zeit erfassbar. Im Fall grosser Bewegungen sind in jedem Fall weitere engmaschige Überwachungsmassnahmen angezeigt. Um einen besseren dreidimensionalen Eindruck der Bewegung zu erhalten, instabile Bereiche besser zuordnen zu können und verlässliche absolute Deformationsbeträge zu erhalten, empfiehlt sich sobald wie möglich Messungen mit einem terrestrischen Laserscanner zum Monitoring hinzuzuziehen.

Werden in den ersten Stunden bis Tagen keine grossen Bewegungen erfasst, kann die Überwachungsfrequenz auf Wochen bis Monate verringert werden. Ein frühzeitiger Abbruch der Messungen ist jedoch nicht ratsam. Bewegungen in hochalpinen Felswänden können stark saisonal beeinflusst sein. Entscheidend sind daher Bewegungen auf Jahresbasis. Das Monitoring sollte daher mindestens für ein Jahr beibehalten werden. Grosse Bewegungen auf Jahresbasis liegen im Bereich

von Zentimetern und sind irreversibel. Werden diese Werte erreicht, ist eine neuerliche Intensivierung der Überwachungsmessungen ratsam. Sind die Deformationen auf ein kleines Gebiet begrenzt welches ausserdem gut zugänglich ist, kann dieser Bereich mit Prismen ausgestattet werden um hochpräzise tachymetrische Punktmessungen durchzuführen. Zeigt das Monitoring kleine Bewegungen unklarer Ursache, kann eine längerfristige Radarüberwachung in grösseren Zeitabständen sinnvoll werden. Auch die Installation von Extensometern (mit Datenübertragung) in Klüften, in denen die Hauptbewegung vermutet wird, kann in so einem Fall Klarheit schaffen. Sind die Kluftbewegungen reversibel besteht keine akute Gefahr, sind sie irreversibel ist ein zukünftiger Felssturz an dieser Stelle wahrscheinlich und die Geländeüberwachung sollte aufrecht erhalten werden.

Sobald grosse Bewegungen gemessen werden, sollten in jedem Fall ausgehend von den Messergebnissen potentielle Felssturzszenarien modelliert werden. Obwohl die Abschätzung von Auslaufzonen nicht Teil dieses Leitfadens ist, soll darauf hingewiesen werden, dass grosse Felsstürze ($> 100'000 \text{ m}^3$) und Bergstürze aus Permafrostregionen häufig im Winter stattfinden und auf eine dicke Schneedecke fallen. Die Felsstürze am Piz Kesch 2014 und im Val Strem 2016 (beide in Graubünden) haben gezeigt, dass die Auslauflängen von Felsstürzen auf Schnee auch im flachen Terrain aussergewöhnlich gross werden können. Dies sollte für die Beurteilung von Felswandinstabilitäten im Winter berücksichtigt werden.

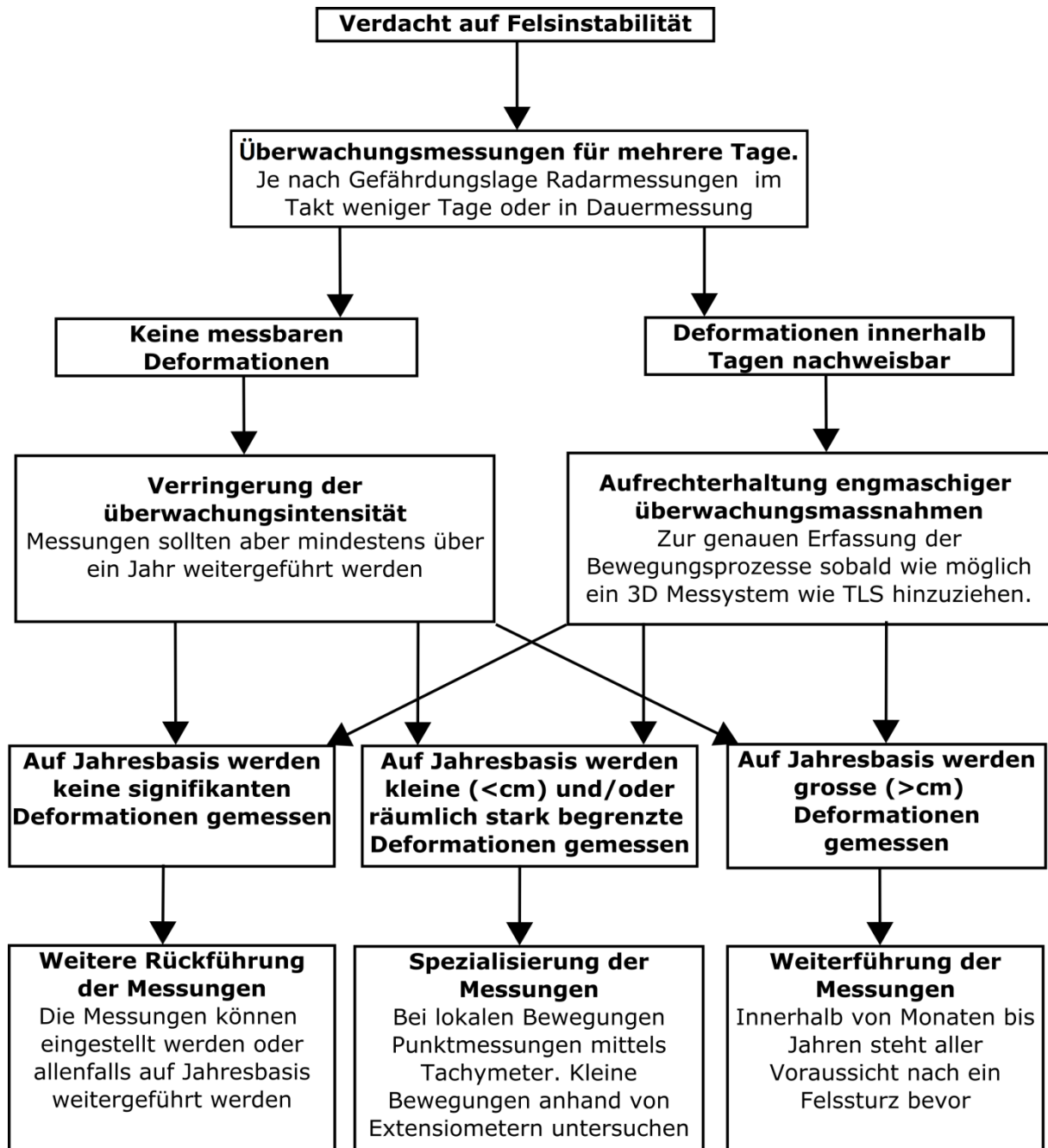


Abbildung 2: Flussdiagramm zu einem möglichen Vorgehen bei instabilen Felswänden im Permafrost

- 2) **Bauvorhaben:** Bauvorhaben in Gebieten, in welchen offensichtlich Felswandinstabilitäten auftreten (ungünstige geologische Struktur, häufiger Steinschlag, Blockschlag) werden durch ein geologisches Gutachten von Beginn an ausgeschlossen. Darüber hinaus sollten vor Baubeginn unbedingt die genaue Stabilität, der Eisgehalt und die Felstemperaturen des Baugrundes überprüft werden. Analog zu vorherigem Kapitel eignen sich für die Stabilitätskontrolle vor allem die Fernerkundungsmethoden Radarinterferometrie und TLS um einen Gesamteindruck der umgebenden Felsstruktur zu erhalten. Extensometer und Punktmessungen können zusätzlich lokal am Baugrund zum Einsatz kommen. Bei allen Methoden genügen in diesem Fall Messintervalle von Monaten bis Jahren. Die Überwachungsmessungen sollten aber bestenfalls mehrere Jahre vor Baubeginn

gestartet werden. Um die Stabilität der Infrastruktur zu gewährleisten, dürfen keine irreversiblen Bewegungen gemessen werden.

Ebenso wichtig ist im Fall von Bauvorhaben, die Existenz von Permafrost und den Eisgehalt im Boden zu überprüfen. Permafrost lässt sich am besten über Temperaturmessungen in Bohrlöchern feststellen. Der Eisgehalt kann durch geophysikalische Messungen wie Geoelektrik oder Geoseismik bestimmt werden. Falls die Existenz von Permafrost festgestellt wird, muss die Bauplanung angepasst werden und Felsverankerungen und Fundamente den Bedingungen im Permafrost angepasst werden. Das SLF hat dazu einen gesonderten Leitfaden publiziert (Bommer et al., 2009). Ist Permafrost vorhanden, sollte weiterhin geklärt werden, ob dieser sich erwärmt und/oder sich die Auftauschicht vertieft und/oder ob Wasserflüsse im Fels stattfinden. Dies wären tendenziell negative Indikatoren für die zukünftige Felsstabilität, besonders dann, wenn sich der Permafrost voraussichtlich über den kritischen Temperaturbereich von -1.5°C erwärmen wird oder sich bereits in diesem befindet. Ist dies der Fall sollten wie im Fall eines hohen Bodeneisgehaltes wenn möglich alternative Standpunkte für das Bauvorhaben erwogen werden.

4. Permafrost in Felswänden und Klimawandel

Ein Felssturz ist der Endpunkt eines teilweise Jahrtausende dauernden Gesamtprozesses der Destabilisierung an dem mindestens 5 treibende Faktoren beteiligt sind. **Permafrost** ist einer dieser Faktoren und hat in Bezug auf die Felswandstabilität sehr widersprüchliche Eigenschaften. Permafrost ist ein stabilisierender Faktor, welcher den Kollaps instabiler Felspartien verhindern kann. Zudem begrenzt er die Tiefenreichweite destruktiver Prozesse wie Frostwechselzyklen und das Eindringen von Wasser in den Fels. Gleichzeitig kann Permafrost aber auch die destabilisierende Wirkung weiterer Faktoren verstärken:

So begünstigt Permafrost **kryostatischen Druck** durch Eissegregation (dauerhaft negative Temperaturen) und Frostsprengung (Ausbildung einer geschlossenen Gefrierfront um Wasser). Auch **thermomechanische Prozesse** haben einen stärkeren Effekt im Permafrost, da Eis in Spalten einen deutlich höheren Ausdehnungskoeffizienten hat als der Fels selber. So katalysiert Permafrost die Felszerklüftung, verhindert aber gleichzeitig Massenbewegungen. Sobald der Permafrost sich aber erwärmt oder verschwindet, werden die geschaffenen Instabilitäten aktiviert. Dies geschieht in Folge des Klimawandels, welcher nicht nur für eine Zunahme von Durchschnittstemperaturen und extremen Hitzeereignissen sorgt, sondern auch eine Häufung von Starkniederschlägen im Hochgebirge verursacht (Scherrer et al., 2016).

Die verbleibenden zwei Faktoren **Gletscher** und **Starkniederschläge** können neben ihren eigentlichen destruktiven Eigenschaften gegenüber Felswänden diese Permafrosterwärmung noch verstärken: Permafrost kann im Zuge einer Ausaperung zuvor vergletscherter Felswände in Ungleichgewicht kommen und seine stabilisierende Wirkung verlieren (Davies et al., 2001). Starke Regenfälle führen einer Felswand mit Permafrost grosse Mengen laterale Energie zu und können für eine Erwärmung des Klufteises führen.

Permafrost ist an sich nur ein thermischer Zustand und damit kaum ein Auslöser von Felsstürzen, er hat allerdings eine regulatorische Funktion. Er kann destruktive Prozesse

sowohl verstärken als auch bremsen und Instabilitäten konservieren oder aktivieren. In der jetzigen Phase von Permafrosterwärmung und -degeneration werden vor allem alte, latente Instabilitäten aktiviert. Gleichzeitig erlauben tiefere Auftauschichten ein weitreichenderes Wirken von Frostwechselzyklen und Niederschlagswasser. In der Folge sind wir für die Zeit, in der die Veränderungen im Permafrost anhalten, mit einer deutlich erhöhten Frequenz von Felssturzereignissen konfrontiert.

5. Weiterführende Literatur

- Bommer C, Phillips M, Keusen HR, Teyssie P, 2009. Bauen im Permafrost: Ein Leitfaden für die Praxis. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, 126 pp
- Davies MCR, Hamza O, Harris C. 2001. The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes* 12: 137-144
- Kenner R, Chinellato G, Iasio C, Mosna D, Cuzzo G, Benedetti E, Visconti MG, Manunta M, Phillips M, Mair V, Zischg A, Thiebes B, Strada C. 2016. Integration of space-borne DInSAR data in a multi-method monitoring concept for alpine mass movements. *Cold Regions Science and Technology* 131: 65-75. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.09.007>
- Kenner R, Phillips M, Amann F, Bonanomi Y, Kos A, Mair V, 2017. Fels- und Bergstürze in Permafrost Gebieten: Einflussfaktoren, Auslösemechanismen und Schlussfolgerungen für die Praxis
- Margreth S, 2007. Defense structures in avalanche starting zones. Technical Guideline as an aid to enforcement. *Environment in Practice*. FOEN, SLF, Bern and Davos, 134 pp
- Scherrer SC, Fischer EM, Posselt R, Liniger MA, Croci-Maspoli M, Knutti R. 2016. Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 121(6): 2626-2637. doi: 10.1002/2015JD024634