

Zeitschrift:	Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology
Herausgeber:	Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie
Band:	27 (2022)
Heft:	1
Artikel:	Felsstürze im warmen Permafrost : Quantifizierung des Risikos aus potenziellen Anrissgebieten im Kanton Wallis
Autor:	Kenner, Robert / Lüthi, Rachel / Singeisen, Corinne
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1036128

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 06.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Felsstürze im warmen Permafrost: Quantifizierung des Risikos aus potenziellen Anrissgebieten im Kanton Wallis

Robert Kenner^{1,3}, Rachel Lüthi², Corinne Singeisen²,
Marcia Phillips^{1,3}, Ulrich Burchard², Evelyn Zenklusen Mutter²

Stichworte/Keywords: Felsstürze, Permafrost, Naturgefahren, Prozessketten, Klimawandel, Früherkennung

Zusammenfassung

Im Zuge des Klimawandels kann auftauender oder sich auf nahe 0°C erwärmender Permafrost zu einer Häufung von Felsstürzen in steilem Gelände führen. Diese Studie hat deshalb steile Felshänge des Wallis in einem Temperaturbereich von -3°C bis 0°C auf ihr Gefährdungspotenzial für tiefer liegende Infrastrukturen untersucht. Dazu wurde die Präsenz von sensibler Infrastruktur im Gefährdungsbereich ebenso berücksichtigt wie die aus mehreren Einzelkriterien zusammengesetzte Wahrscheinlichkeit für Sturzereignisse. Zusammen ergeben beide Faktoren einen Risikohinweis für jeden Steilhangsektor im betreffenden Bodentemperaturintervall. Auf Grundlage dieses Risikohinweises zeigt sich, dass sich die potenzielle Gefährdung durch grosse Felsstürze aus warmem Permafrost auf 89 Standorte im Kanton Wallis beschränkt. Für diese Standorte wurde in Abhängigkeit des Risikos eine Rangliste erstellt, welche es den Naturgefahrenverantwortlichen ermöglicht, einen Fokus auf diese Gebiete zu legen sowie mit präventiven Massnahmen und Vorkehrungen eine Gefahrensituation frühzeitig zu erkennen.

1 Einleitung

Felswände an der unteren Permafrostgrenze reagieren besonders sensiv auf die Erwärmung des Klimas. Die Erhöhung des Wasser/Eis-Verhältnisses in Felsklüften und in der Felsmikrostruktur können eine positive Rückkopplung destabilisierender Prozesse auslösen (Kenner et al., 2021). Sich verstärkende, destruktive Kräfte wie hydrostatische (Fischer et al., 2010) oder kryostatische (Hall et al., 2002; Girard et al., 2013) Drücke im Kluftsystem gehen einher mit der gleichzeitigen Schwächung rückhaltender Kräfte, beispielsweise Reibungsverlusten im Kluftsystem (Wieczorek and Jäger, 1996) oder der Schwächung der Felsmikrostruktur durch zunehmende Wassersättigung (Voigtländer et al., 2018) oder Frostwechsel (Jia et al., 2015). Erhöhte Wasserdurchlässigkeit, konvektive Wärmeflüsse und die Zerrüttung der Felssmasse sind dabei drei Faktoren eines Prozesses, welche in ihrer Kombination eine sich selbstverstärkende Wirkung entwickeln können. In Abhängigkeit der Topographie und strukturellen Disposition kann sich dies entscheidend auf die Stabilität grosser Felssmassen auswirken. Für Siedlungen, touristische Infrastrukturen und andere bislang als sicher betrachtete Gebiete können sich neue Gefahrenpotenziale entwickeln (Felsstürze, Murgänge, erhöhter Geschiebeanfall, Erosionsprozesse, Prozessketten). Im Alpenraum ist es bereits zu solchen Ereignissen aus gefrorenen Felswänden gekommen (z.B. Ross-

¹ WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Flüelastrasse 11, 7260 Davos

² geoformer igr AG, Sebastiansplatz 1, 3900 Brig

³ Climate Change, Extremes and Natural Hazards in Alpine Regions Research Center CERC

bodengletscher 1901 (Raymond et al., 2003) oder Pizzo Cengalo GR 2011 und 2017 (Walter et al., 2020)).

Für Naturgefahrenverantwortliche ist die zu erwartende Zunahme von grossen Felsinstabilitäten im Hochgebirge eine Herausforderung. Eine flächendeckende Überwachung kritischer Hangbereiche ist aus technischen Gründen und aufgrund hoher Kosten vorerst nicht realisierbar. Gleichzeitig werden strukturelle Veränderungen in den Anrissgebieten aufgrund ihrer Unzugänglichkeit oftmals nicht oder erst sehr spät erkannt. Da grosse Bergstürze in den vergangenen Jahrzehnten bis Jahrhunderten relativ seltene Ereignisse waren, sprengt das Gefährdungspotenzial zudem oftmals die historische Erfahrung. Besonders im Untersuchungsgebiet dieser Studie, dem Kanton Wallis, mit seinen teils steil eingeschnittenen Tälern und den kurzen Distanzen zwischen den Gefahrenquellen und den besiedelten oder touristisch genutzten Gebieten, können sich aufgrund der klimabedingten Veränderungen zukünftig neue Gefahrengebiete entwickeln.

Um Gefahren aus warmen Permafrostfelswänden effizienter und effektiver begegnen zu können, ist es nützlich, Gebiete mit hohem

Risiko so gut wie möglich einzugrenzen. Dies ermöglicht es den Verantwortlichen, sich auf eine begrenzte Anzahl von Standorten zu fokussieren und dort weitergehende Untersuchungen oder Überwachungsmassnahmen zu ergreifen.

Im Rahmen eines vom Bundesamt für Umwelt BAFU lancierten Pilotprogramms zur Anpassung an den Klimawandel wurde in der vorliegenden Studie eine eben solche Eingrenzung von Gebieten vorgenommen, in welchen Felswände aufgrund ihrer Disposition und Lage oberhalb von Siedlungen, Verkehrswegen oder anderer Infrastrukturen ein besonders grosses Risikopotential schaffen. Ausgehend von der Gesamtheit aller Felswände mit warmem Permafrost im Kanton Wallis wurden die Gebiete anhand verschiedener Kriterien schrittweise reduziert, wobei die Tiefe der Analyse mit sinkender Anzahl Standorte bei jedem Schritt vergrössert werden konnte.

2 Methodik

Die für diese Studie entwickelte Methodik zur Beurteilung von Permafrostfelswänden im Kanton Wallis basiert auf 3 Säulen:

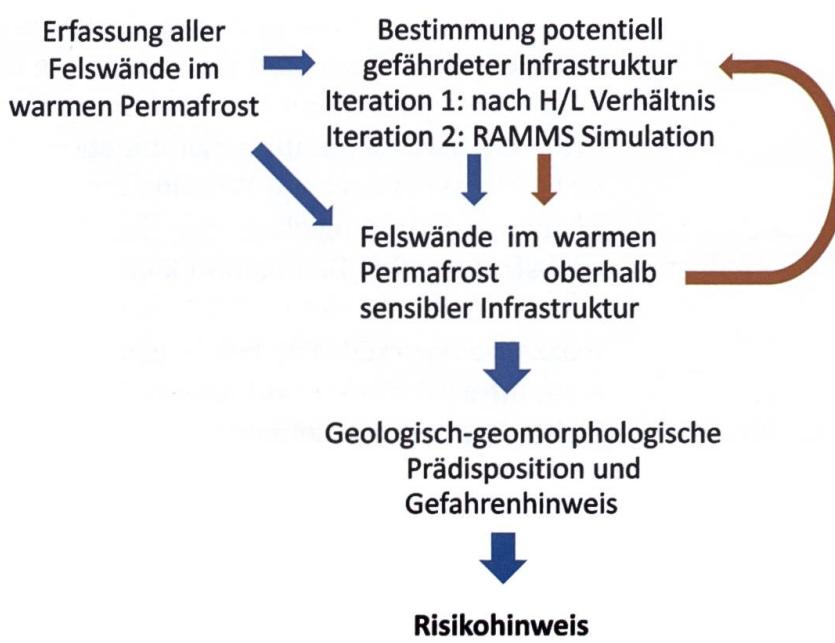


Fig. 1: Arbeitsschritte in chronologischer Reihenfolge.

- 1) Der Abschätzung, ob ein Felssturz aus diesem Gebiet kritische Infrastrukturen oder Siedlungen treffen kann.
- 2) Der Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit eines zukünftigen grossen Felssturzes aus einer Felswand im Permafrost.
- 3) Einer Gesamtrisikobewertung (Risiko-hinweis) pro Standort in Abhängigkeit von 1) und 2).

Um die grosse Anzahl an steilen Felshängen im Kanton Wallis beurteilen zu können, wurde ein iteratives Verfahren angewendet. Dabei wird die Auswahl an Standorten bei gleichzeitiger Zunahme der Bearbeitungstiefe schrittweise verringert. Die einzelnen Arbeitsschritte sind in Figur 1 zusammengefasst und werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

2.1 Erfassung aller Felswände im warmen Permafrost

Es gibt deutliche Hinweise darauf, dass vor allem grössere Felsstürze $>100'000 \text{ m}^3$ vermehrt in Gebieten mit warmem Permafrost zwischen 0°C und -3°C auftreten (Gruber and Haeberli, 2007; Krautblatter et al., 2013; Voigtlander et al., 2018). Als Auslöser dafür gelten die in der Einführung beschrieben Prozesse. Unsere Studie fokussierte sich dementsprechend auf die Gebiete innerhalb des oben genannten Bodentemperaturintervalls. Als Grundlage für die Erfassung dieser Gebiete wurde die Permafrost- und Bodeneiskarte des SLF (PGIM) verwendet (Kenner et al., 2019). Diese Karte gibt für eisarmen Permafrost, wie er in Felswänden vorkommt, Durchschnittstemperaturen an, welche über eine Regression aus Höhenlage und potenzieller Sonneneinstrahlung berechnet wurden.

Innerhalb dieser Gebiete mit warmem Permafrost wurde in Anlehnung an Fischer et

al. (2012) steiles Terrain mit einer Neigung von $>40^\circ$ ausgefiltert. Die durchschnittliche Hangneigung wurde über einen Mittelwertfilter aus dem Höhenmodell swissALTI3D (swisstopo, 2018) des Schweizer Bundesamtes für Landestopografie (Swisstopo) berechnet. Um einzelne Hangsektoren zu definieren, wurden die verbleibenden Flächen in kleine hydrologische Einzugsgebiete von maximal $500'000 \text{ m}^2$ Fläche unterteilt.

Aufgrund des Filters nach Permafrosttemperatur und Topographie resultierte ein Total von 10'712 potenziell instabilen Standorten. Im Rahmen des Projekts sollen nur sehr grosse Felssturz- und Bergsturzpotenziale betrachtet werden. Kleine Hangsektoren mit einer projizierten Grundrissfläche $<20'000 \text{ m}^2$ oder solche mit einer geringen Höhendifferenz von maximal 150 m wurden deshalb in der weiteren Analyse nicht berücksichtigt. Nicht durch diesen Filter erfasste, sehr schmale Sektoren wurden manuell gelöscht, was die Anzahl Standorte auf 1'864 reduzierte.

2.2 Bestimmung potenziell gefährdeter Infrastruktur

In diesem Arbeitsschritt geht es darum festzustellen, ob ein Felssturz aus einem der zuvor definierten Geländeabschnitte, Siedlungen, Verkehrswege oder sensible Infrastruktur treffen kann (Methodik, Säule 1). Die Bestimmung potenziell gefährdeter Gebiete erfolgte für die potenziellen Felssturzanzugsgebiete zunächst über ein Höhe/Länge-Verhältnis (H/L) der potenziellen Auslaufzonen. Die Auslaufzonen wurden definiert, indem aus dem Zentrum der betreffenden Felswandsektoren ein Hanggradient berechnet wurde, um welchen beidseitig eine Pufferzone von 200 m gelegt wurde. Diese Fläche von 400 m Breite entsprach dann der etwaigen Auslaufzone von Stürzen aus dieser Wand. Die Länge dieser Auslaufzonen wurde durch ein H/L Verhältnis von 0.4 begrenzt, gemessen entlang des Hanggradienten. Das Höhen/Länge-Verhältnis

nis unterscheidet sich vom Fahrböschungswinkel, indem es auch auf nicht lineare Auslaufzonen angewendet werden kann und sich somit auch für grosse Felsstürze eignet. Der Grenzwert von 0.4 entspricht dem kleinsten H/L Verhältnis, welches unter den Stürzen in der SLF Permafrost-Felssturzdatenbank auftrat. In dieser Datenbank wurden Sturzereignisse im alpinen Raum der Schweiz und den Grenzregionen der Nachbarländer erfasst. Die Datenbank umfasst mehr als 400 Einträge aus den vergangenen 300 Jahren. H/L Verhältnisse von 0.4 wurde von einigen Stürzen auf Gletscher und dicke Schneedecken erreicht. Dabei wurden allerdings nur reine Sturzprozesse berücksichtigt, keine Murgänge. Es handelt sich um einen sehr konservativen Wert, welcher die tatsächlichen Auslauflängen meist deutlich überschätzt. Bei Felslawinen mit sehr hohem Schnee- oder Eisanteil sind allerdings noch kleinere H/L Verhältnisse bekannt (Dade and Huppert, 1998).

Zur Identifikation von Felswänden, welche im Falle eines Felssturzes eine Gefahr für

Infrastruktur (Schadenpotenzial) darstellen, wurden diese Auslaufzonen mit der in Tabelle 1 aufgeführten Infrastruktur verschnitten. Betraf eine Auslaufzone Infrastruktur aus Tabelle 1, wurde dies als Attribut der Auslauffläche sowie des Anrissektors vermerkt. Insgesamt war dies bei 165 Standorten der Fall.

2.3 Detaillierte Bestimmung potenziell gefährlicher Felswände im Permafrost

Die nun deutlich reduzierte Anzahl an Standorten erlaubte erstmals eine realistischere Kartierung der potenziellen Anrissgebiete auf Basis einer gutachterlichen Einschätzung. Mithilfe von Orthofotos und der Landeskarten im Massstab 1:10'000 wurde für jede Felswand gutachterlich die grösstmögliche plausible Anrisszone festgelegt.

Ausgehend von diesen Anrisszonen wurden mit dem Lawinenmodul der Simulationssoftware RAMMS Auslaufzonen für jeden Stand-

Art der Infrastruktur	Auswahlkriterien für individuelle Objekte
Gebäude	Alle Gebäude, welche nicht weiter als 100 m von einer Strasse mit hartem Belag entfernt liegen. Die Strasse muss eine direkte Verbindung mit dem durch harten Belag befestigten Strassennetz haben. Bewirtschaftete Berghütten und Gasthäuser
Eisenbahnlinien	Alle Verbindungen, ausser Tunnelstrecken
Bundes- und Kantonsstrassen	Alle Verbindungen, ausser Tunnelstrecken
Andere Strassen und Verkehrsflächen	Alle Strassen mit hartem Belag, welche eine direkte Verbindung mit dem durch harten Belag befestigten Strassennetz haben, ausser Bundes- und Kantonsstrassen sowie Tunnelstrecken. Andere Verkehrsflächen wie Parkplätze
Stauanlagen	Alle Arten von Stauanlagen z. B. Ausgleichsbecken, Dämme und Staumauern kategorisiert nach Grösse
Seilbahnen und Lifte	Alle Anlagen
Freizeitanlagen	Alle Anlagen z. B. Sportplätze, Freibäder oder Campingplätze

Tab. 1: Übersicht über die verwendeten Infrastruktur Datensätze. Alle Daten stammen aus dem Swiss topo Infrastrukturdatensatz TLM3D.

ort bestimmt (Christen et al., 2012). Das Volumen der potenziellen Felsstürze wurde empirisch aus bekannten Ereignissen der SLF Permafrost-Felssturzdatenbank über die Formel $V = A[\cdot A]^0.3$ hergeleitet, wobei A der 3D-Fläche der Anrissgebiete entspricht. Die RAMMS-Simulationen wurden mit den Reibungsparametern $\mu = 0.2$ und $\xi = 500 \text{ m/s}^2$ (für eine mit viel Schnee oder Eis bedeckte Auslaufzone), sowie $\mu = 0.3$ und $\xi = 500 \text{ m/s}^2$ (raue, apere Auslaufzone) durchgeführt. Als Entscheidungskriterium für die Reibungsparameter diente ein räumlich hoch aufgelöstes Modell des mittleren Schnee-Wasser-Äquivalentes (SWE) Mitte Mai (Jonas, 2012). Auslaufzonen mit einem SWE $>200 \text{ mm}$ im Flächenmittel wurden mit den tiefen Reibungsparametern berechnet, Auslaufzonen mit einem SWE $<200 \text{ mm}$ mit den hohen Reibungsparametern.

Anschliessend wurden die neuen, genaueren Auslaufzonen erneut mit der in Tabelle 2 aufgelisteten Infrastruktur verschnitten.

Von den 165 Standorten, für welche die RAMMS-Simulationen durchgeführt wurden, trafen nur noch 89 Standorte relevante Infrastruktur (Fig. 2). Für jeden dieser Standorte wurde außerdem geprüft, ob sich Gletscher oder Seen innerhalb der Auslaufzone befinden. Diese wurden als zusätzliche Risikofaktoren betrachtet, da sie die Reichweite eines Sturzes erhöhen können, respektive zu Flutwellen oder Murgängen führen können. Um als solche Risikofaktoren berücksichtigt zu werden, wurde für Gletscher eine Mindestfläche von $100'000 \text{ m}^2$ innerhalb der Auslaufzone als Grenzwert angesetzt; für Seen ein Grenzwert von $10'000 \text{ m}^2$.

2.4 Geologisch-geomorphologische Prädisposition und Gefahrenhinweis

Bei der Beurteilung der geologisch-geomorphologischen Prädisposition geht es darum, die Eintretenswahrscheinlichkeit



Fig. 2: Kartenausschnitt mit exemplarischen Felssturzrissgebieten (rot), sowie den dazugehörigen, mit RAMMS simulierten Auslaufzonen (orange).

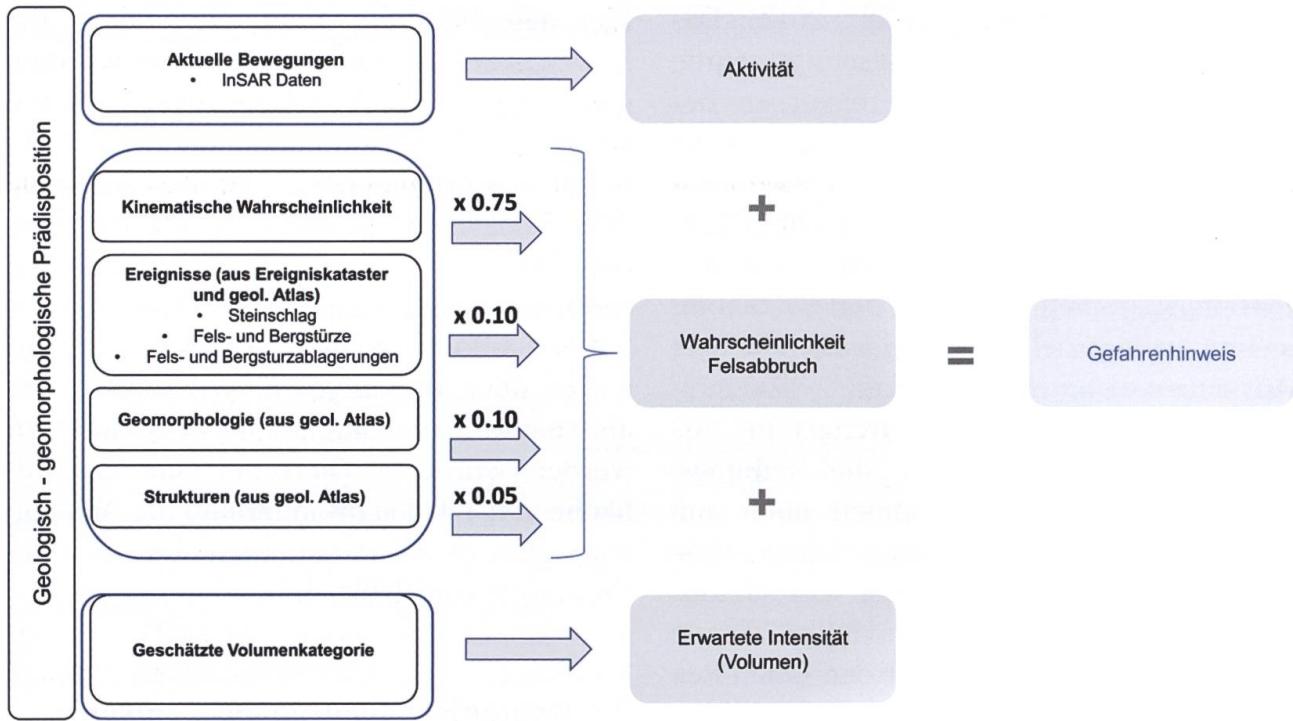


Fig. 3: Kriterien zur Beurteilung der geologisch-geomorphologischen Prädisposition und Herleitung des Gefahrenhinweises.

eines grossen Felssturzes aus einer Felswand abzuschätzen (Methodik, Säule 2). Diese Beurteilung beruht auf Kriterien, welche in Abhängigkeit ihrer Ausprägung mit einem höheren oder tieferen Wert versehen wurden. Die Summe dieser Werte ergibt einen Gefahrenhinweis, welcher die geologisch-geomorphologische Prädisposition mit einem Gesamtwert zwischen 0 und 3 beschreibt (Fig. 3).

Aktuelle Bewegungen: Aktuelle Bewegungen in einer Felswand sind direkte Hinweise einer aktiven Instabilität. Zur Beurteilung dienten vom Kanton Wallis zur Verfügung gestellte InSAR Bewegungszeitreihen der Satelliten Sentinel 1 und Radarsat 2 (CREALP, 2022). Bei einem Wert von 1 sind Bewegungen >2 mm/Jahr eindeutig erkennbar. Ein Wert von 0.5 weist auf eine ungenügende Datenlage oder unsichere Beurteilung hin (z.B. Radarschatten). Bei einem Wert von 0 zeigen die INSAR-Daten keine Bewegungen an.

Wahrscheinlichkeit Felsabbruch: Dieses Kriterium setzt sich aus 4 Subkriterien zusam-

men. Diese Subkriterien können einen Wert zwischen 0 und 1 erhalten und fliessen mit unterschiedlichen Gewichten in eine Gesamtsumme ein. Die Gewichtung der Kriterien wurde gutachterlich festgelegt. Dabei wurden mit einer Sensitivitätsanalyse drei Varianten der Gewichtung getestet, wobei sich zeigte, dass die Resultate ähnlich bleiben.

Kinematische Wahrscheinlichkeit: Die kinematische Wahrscheinlichkeit ergibt sich aus der Analyse potenzieller Ablösemechanismen. Dazu wurden die Orientierungen der dominierenden Felsdiskontinuitäten eines Hangs mithilfe der Software «Coltop3D» (Jaboyedoff et al., 2007) aus dem Höhenmodell SwissAlti 3D (50 cm Auflösung) abgeleitet. Unter Berücksichtigung der Reibungswinkel dieser Diskontinuitäten wurde dann eine kinematische Analyse mit der Software «Dips 7.0» von Rocscience durchgeführt. Dabei wurde die Möglichkeit der Ablösemechanismen 'Blockgleiten (planar Sliding)', 'Keilgleiten (Wedge Sliding)', 'Duktiles Kippen (Flexural Toppling)' und 'Sprödes Kippen (Direct Toppling)' entlang bestehender Diskontinuitäten

beurteilt (Wyllie and Mah, 2004). Zusätzlich wurden Daten zum geologischen Gefüge (d.h. Schichtung oder Schieferung) aus dem Geologischen Atlas der Schweiz und GeoCover berücksichtigt. Die verwendeten Werte der Reibungswinkel sind abhängig von der Lithologie und basieren auf den Werten von Kellerhals and Isler (1998). Die kinematische Analyse ist eine robuste und direkte Einschätzung der strukturellen Prädisposition von Felsinstabilitäten, auf Basis einer flächendeckend, homogen verfügbaren Datengrundlage. Das Subkriterium «kinematische Wahrscheinlichkeit» erhält den Wert 1, wenn mehrere mögliche Ablösemechanismen nachgewiesen wurden und einen Wert von 0.5 bei einem möglichen Ablösemechanismus. Dieser Wert geht mit einem Gewicht von 0.75 in das Kriterium «Wahrscheinlichkeit Felsabbruch» ein. Komplexe Ablösemechanismen wie z.B. Bruchfläche mit Brüchen durch intaktes Gestein werden in dieser Analyse jedoch nicht berücksichtigt.

Ereignisse: Zeichen früherer Sturzereignisse sind ein Hinweis, dass die geologisch-geomorphologische Prädisposition an einem Standort gegeben ist und möglicherweise weitere Ereignisse auftreten könnten. Es wurden Daten aus dem Stein- und Felssturz Ereigniskataster «Guardaval» des Kantons Wallis und der Felssturzdatenbank des SLF sowie kartierte Sturzablagerungen aus dem geologischen Atlas und GeoCover ausgewertet. Dieses Subkriterium bietet einen direkten Hinweis auf Aktivität und Prädisposition, jedoch ist die Datengrundlage nicht für alle Standorte vollständig und einheitlich. Im Fall eines dokumentierten Ereignisses erhält dieses Subkriterium den Wert 1, geht aufgrund der suboptimalen Datenverfügbarkeit aber nur mit einem Gewicht von 0.1 in das Kriterium «Wahrscheinlichkeit Felsabbruch» ein.

Geomorphologie: Aktive Felsinstabilitäten können charakteristische geomorphologische Merkmale, wie z.B. Nackentälchen, Abrisskanten oder offene Klüfte aufweisen.

Hierzu wurde der geologische Atlas und das GeoCover bezüglich relevanter Instabilitätsmerkmale ausgewertet. Auch dieses Subkriterium bietet einen direkten Hinweis auf Aktivität und Prädisposition, ist aber ebenfalls nicht einheitlich erfasst. Im Fall von Instabilitätsmerkmalen im potenziellen Anrissgebiet erhält dieses Subkriterium den Wert 1, geht aufgrund der suboptimalen Datenverfügbarkeit aber nur mit einem Gewicht von 0.1 in das Kriterium «Wahrscheinlichkeit Felsabbruch» ein.

Strukturen: Tektonische Strukturen wie Brüche und Verwerfungen können Instabilitäten begünstigen, da das umliegende Gestein entlang dieser Strukturen oft stärker zerklüftet ist (Brideau et al., 2009; Fan et al., 2019), was die Infiltration von Kluftwasser erleichtert. Es wurden alle im geologischen Atlas und GeoCover kartierten tektonischen Strukturen berücksichtigt und in zwei Kategorien eingeteilt: (1) lokale tektonische Strukturen wie Brüche und Verwerfungen und (2) regionale/übergeordnete tektonische Strukturen wie Überschiebungen und Deckengrenzen. Bei einem Wert von 1 sind am Standort mehrere lokale oder eine regionale tektonische Struktur vorhanden, bei einem Wert von 0.5 ist eine lokale tektonische Struktur vorhanden und bei einem Wert von 0 sind keine tektonischen Strukturen kartiert. Da die tektonischen Strukturen nur einen indirekten Hinweis auf mögliche Instabilitäten liefern, wurde dieses Subkriterium mit einer Gewichtung von 0.05 berücksichtigt.

Geschätzte Volumenkategorie: Mit zunehmenden Ablösevolumen steigen die Auslaufweiten und Intensitäten eines möglichen Ereignisses (Sosio et al., 2012). Eine Volumenabschätzung eines möglichen Ereignisses ist jedoch grundsätzlich schwierig und die Unsicherheiten sind insbesondere bei einer standardisierten Analyse vieler Standorte gross. Daher wurde die Volumenabschätzung in drei Kategorien vorgenommen: (1) Felssturz <100'000 m³, (2) Felssturz 100'000 – 1 Mio. m³

und (3) Bergsturz >1 Mio. m³. Die Volumenabschätzung wurde gutachterlich aufgrund der Topographie des Standorts und der Persistenz der Diskontinuitäten in der Coltop3D Analyse durchgeführt und bezieht sich auf das grösstmöglich denkbare Ablösevolumen pro Standort. Im Kriterium «Geschätzte Intensität (Volumenkategorie)» erhalten mögliche Felsstürze <100'000 m³ einen Wert von 0.33, Felsstürze 100'000 – 1 Mio. m³ einen Wert von 0.66 und Bergstürze >1 Mio. m³ einen Wert von 1.

2.5 Risikohinweis

Der Risikohinweis (Methodik, Säule 3) wird aus der Abschätzung, ob kritische Infrastruktur oder Siedlungen betroffen werden können (Methodik, Säule 1) und der Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit eines Felssturzes (Methodik, Säule 2) hergeleitet. Diese Herleitung ist an die Methodik angelehnt, welche für die Risikobewertung der gefährlichen Gletscher im Kanton Wallis bereits verwendet wird (geoformer igp AG, 2018). Darin fliessen die Gefahrenart (A), die betroffene Infrastruktur (B) sowie die geologisch-geomorphologische Prädisposition (C) ein:

$$RH = (\sum A + \sum B) * C$$

Die Parameter A, B und C sind in Tabelle 2 aufgeschlüsselt. Parameter A kann aufsummiert einen Wert zwischen 1 und 3 erreichen und beschreibt das Risiko von Prozessketten infolge eines Felssturzes.

Parameter	Werte
A: Gefahrenart	Felssturz: 1 Felssturz auf Gletscher: 1 Felssturz in See: 1
B: Betroffene Infrastruktur	Freizeit: 1 Strasse: 1 Lifte: 2 Eisenbahnlinien: 2 Bundes-/Kantonsstrassen: 2 Gebäude: 3 Stauanlagen: 1-4 1: Ausgleichsbecken/ Auffangbecken mit sehr kleiner Kronenhöhe 2: Dämme kleiner Staubecken 3: mittlere Staumauern 4: Große Staumauern
C: Geologisch-geomorphologische Prädisposition	Gefahrenhinweis zwischen 0 und 3

Tab. 2: Für den Risikohinweis verwendete Bewertungen.

Parameter B ergibt sich aus der Summe und Sensibilität der betroffenen Infrastrukturen (Methodik Säule 1). Parameter C entspricht dem Gefahrenhinweis wie er in Abschnitt 2.3. beschrieben wurde (Methodik Säule 2).

2.6 Validierung

Zur Validierung unserer Methodik wurden sowohl stichprobenhafte Feldbegehungen durchgeführt wie auch die Gefahrenhinweise an Standorten bereits eingetretener Felssturzereignisse getestet. Im Zuge der Feldbegehungen wurden mithilfe einer Checkliste

Standort	Bekanntes Ereignis	Gefahrenhinweis (Rang)
Pizzo Cengalo (GR) (Walter et al., 2020)	23.08.2017, ca. 3 Mio. m ³	2.57 (4)
Piz Kesch (GR) (Phillips et al., 2017)	Februar 2014, ca. 150'000 m ³	2.04 (14)
Flüela Wisshorn (GR) (Kenner et al., 2019)	19.03.2019, ca. 250'000 m ³	2.06 (13)

Tab. 3: Gefahrenhinweise für zurückliegende Felssturzereignisse

die folgenden, für die Risikohinweise massgebenden Parameter kontrolliert:

- Mögliche Prozessketten
- Schadenpotential
- Aktivitätsanzeichen
- Coltop3D-Analyse/massgebende Trennflächen
- Maximale Sturzvolumina

Bei den Fels- resp. Bergstürzen am Pizzo Cengalo, am Flüela Wisshorn und am Piz Kesch (Tab. 3) wurden die Gefahrenhinweise (geologisch-geomorphologische Prädisposition) für die Situation vor den Stürzen berechnet.

Im Vergleich zur Beurteilung der Standorte im Kanton Wallis standen im Kanton Graubünden keine InSAR Daten für die Situation vor den Ereignissen zur Verfügung. Deshalb wurde für die Beurteilung des Kriteriums 'Aktuelle Bewegungen' für den Pizzo Cengalo 1 (Aktivität bekannt) und für Piz Kesch und Flüela Wisshorn 0.5 (Aktivität unbekannt) eingesetzt. Für die Coltop3D-Analyse wurden die Geländemodelle von vor den Stürzen verwendet. Diese hatten im Gegensatz zu den neueren Produkten eine Auflösung von 2 m.

3 Resultate

3.1 Validierung der Methode

Die hergeleiteten Gefahrenhinweise für die geologisch-geomorphologische Prädisposition der zurückliegenden Ereignisse in Tabelle 3 befinden sich im Bereich der Top 14 Standorte im Kanton Wallis (Pizzo Cengalo: Rang 4, Piz Kesch: Rang 14, Flüela Wisshorn: Rang 13). Dies zeigt, dass die angewendete Methodik die wichtigsten Merkmale der geologisch-geomorphologischen Prädisposition von Felsinstabilitäten erfasst und zuverlässige Ergebnisse liefert.

Die Resultate der Feldbegehungen zeigten, dass bei allen vier besuchten Standorten Instabilitätsanzeichen wie offene Risse und/ oder auch Spuren von rezentem Blockschlag sichtbar waren (Fig. 4). Die bei allen im Feld überprüften Standorten beobachteten offenen Risse konnten auf den Orthofotos in den meisten Fällen nicht erkannt und somit auch nicht systematisch erfasst werden. Sie zeigen jedoch, dass die Auswahl der Standorte plausibel ist. Eine Ablösung eines grösseren Felsvolumens erschien bei allen vier Standorten möglich.

Bei den Prozessketten, dem Schadenpotential und den maximalen Ablösevolumina wur-



Fig. 4: Anlässlich der Feldbegehung beobachtete Instabilitätsanzeichen (offene Risse) im Gipfelbereich der NW-Wand des Hübschhorns (Simplon).

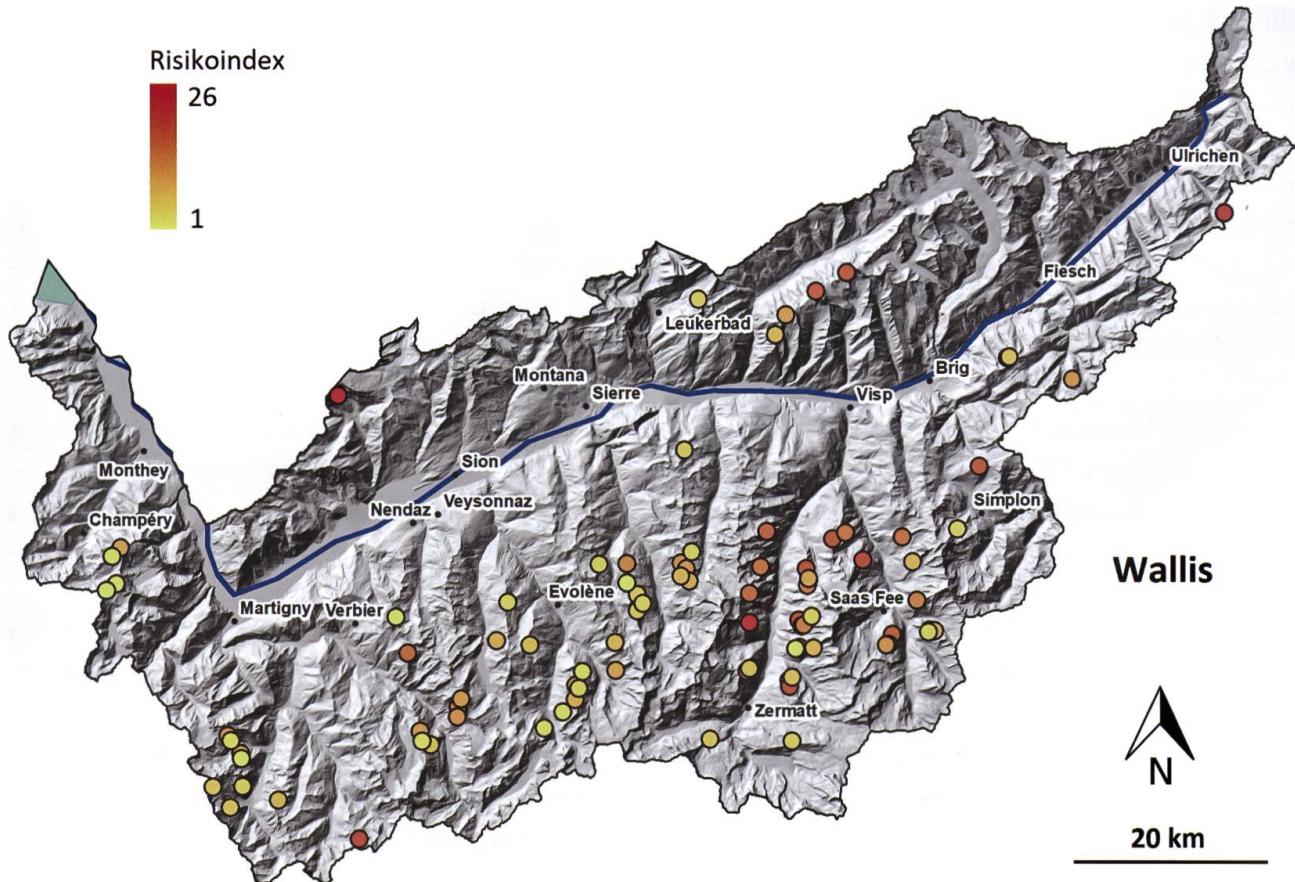


Fig. 5: Räumliche Verteilung der 89 identifizierten Standorte mit Risikoprofil in Bezug auf Fels- und Bergstürze aus warmem Permafrost. Die Farbe widerspiegelt die Höhe des Risikohinweises.

de eine gute Übereinstimmung zwischen der GIS-Analyse und der Feldbeurteilung festgestellt. Hinsichtlich der Aktivitätsanzeichen konnte jedoch auch bei den Feldbegehungen nicht immer zuverlässig abgeschätzt werden,

ob Sturzablagerungen durch einzelne grosse Ereignisse oder durch eine langfristig hohe Erosionstätigkeit entstanden sind. Bezüglich der Coltop3D-Analyse zeigte sich, dass markante Trennflächen oder Schwächezonen,

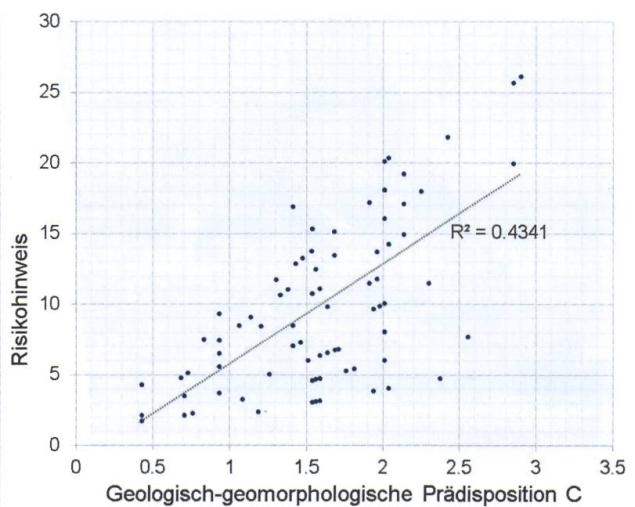
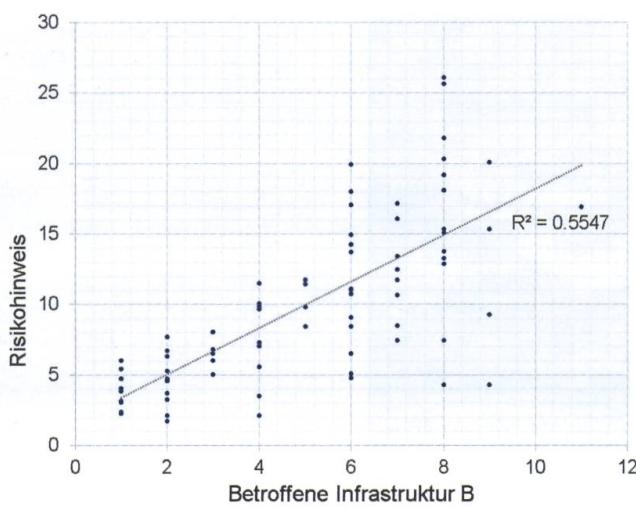


Fig. 6: Risikohinweis in Abhängigkeit der Werte für die betroffene Infrastruktur und der geologisch-geomorphologischen Prädisposition (Gefahrenhinweis).

welche ungefähr orthogonal zur Wandfläche streichen, nicht immer zuverlässig erfasst werden, da diese meist nur als Linien und nicht als Flächen sichtbar sind. Die kinematische Relevanz dieser Flächen ist allerdings meist gering.

3.2 Risikohinweis

Der Risikohinweis beurteilt das Gefährdungspotential von 89 Standorten (Fig. 5). Die Werte des Risikohinweises reichen dabei von 1.7 bis 26.1 mit einem Median von 8.5. Parameter B (betroffene Infrastruktur) und Parameter C (geologisch-geomorphologische Prädisposition) variieren deutlich zwischen den Standorten und tragen in nahezu gleichem Ausmass zu hohen Werten beim Risikohinweis bei (Fig. 6). Hohe Werte bei nur einem der beiden Parameter führen zu eher kleinen Werten im Risikohinweis. Dies ist im Sinne der Methodik und umfasst Fälle mit hoher Instabilität in abgelegenen Gegenden, resp. strukturell stabile Felswände in Siedlungsnähe.

Der Grossteil der Standorte liegt in den Walliser Südtälern Val d'Hérens, Val d'Anniviers, Val de Bagnes, Mattertal und Saastal. Einige Standorte befinden sich im Lötschental und die verbleibenden Standorte in den restlichen Kantonsgebieten (Fig. 5). An 34 Standorten liegen Gletscherflächen $>100'000\text{ m}^2$ in der Auslaufzone potentieller Sturzereignisse, an 5 Standorten Seen $>10'000\text{ m}^2$. An zwei zusätzlichen Standorten könnten sowohl Gletscher als auch Seen getroffen werden. Das Schadenpotenzial der einzelnen Standorte unterscheidet sich deutlich, wobei sich diese Unterschiede nicht zwangsläufig im Risikohinweis widerspiegeln. Dieser unterscheidet beispielsweise nicht zwischen Einzelgebäuden oder einem dicht besiedelten Ortskern. Tatsächlich sind nur etwa 7 Ortschaften des Wallis in ihrem eigentlichen Siedlungsgebiet von potenziellen Auslaufzonen betroffen. Diese liegen in den Walliser Südtälern oberhalb von 1000 m ü.M. Alle anderen Auslaufzo-

nen betreffen im Wesentlichen Verkehrswege und Einzelgebäude mit unterschiedlicher Nutzung sowie Freizeiteinrichtungen.

4 Diskussion und Grenzen der Beurteilung

Aufgrund des mehrstufigen, iterativen Verfahrens konnten grosse Datenmengen systematisch verarbeitet und flächendeckend für den gesamten Kanton Wallis kritische Standorte ermittelt werden. Die Analyse erfolgte teils automatisiert und anhand digital verfügbarer Grundlagen. Die Beurteilung der einzelnen Standorte und die resultierenden Risikohinweise sind dadurch untereinander vergleichbar. Es resultiert eine solide Datengrundlage für allfällige weiterführende, standortspezifische oder regionale Untersuchungen. Dies können Überwachungsmaßnahmen oder detailliertere strukturelle Untersuchungen sein, gegebenenfalls auch Schutz- oder Warnmaßnahmen.

Die Bestimmung potenziell instabiler Felswände basiert auf der Annahme, dass aufgrund der fortschreitenden Erwärmung im Zuge des Klimawandels Felsstürze vermehrt in Hängen steiler als 40° auftreten werden, welche sich in einem kritischen Temperaturbereich zwischen rund 0°C und -3°C befinden. In seltenen Fällen können auch Felsstürze in weniger steilen Hängen auftreten und auch Fels- und Bergstürze in andern Temperaturbereichen sind möglich. Felsinstabilitäten, deren Anrissgebiet nicht im Permafrost liegt, wurden bewusst von der Analyse ausgeschlossen.

Die initiale Bestimmung potenziell gefährdeter Gebiete mithilfe des H/L-Verhältnisses hat sich als konservativer Ansatz erwiesen. Dies zeigt sich insbesondere darin, dass von den 165 Standorten, welche gemäss H/L-Verhältnis Infrastruktur überstreichen, lediglich 89 auch mit den detaillierteren Auslaufzonen Infrastruktur betreffen. Es kann daher davon

ausgegangen werden, dass in der Vorauswahl kaum relevante Standorte übersehen wurden.

Die Beurteilung des Gefahrenhinweises C basiert auf vorhandenen Daten zur Aktivität der Felswände, zur Geologie und Geomorphologie sowie auf der Analyse des Höhenmodells. Unsicherheiten in der Beurteilung aufgrund unterschiedlicher Datenlage an den verschiedenen Standorten können somit nicht ausgeschlossen werden. Dies betrifft insbesondere die Aktivität der Felswände (Bewegungsmessungen und Sturzaktivität), da hier nicht immer zwischen Datenlücken und Inaktivität der Felswände unterschieden werden kann. So ist es beispielsweise möglich, dass Felswände, deren Hangneigung und Exposition ungünstig zum Orbit der InSAR-Satelliten ausgerichtet sind, kein Bewegungsattribut erhalten, obwohl eine Felsbewegung stattfindet. Der Risikohinweis dieser Standorte würde demnach unterschätzt.

Die kinematische Wahrscheinlichkeit eines Felsabbruchs basiert auf der Coltop3D Analyse und in geologischen Karten erfassten Strukturen. Diese Methode ist in massivem Gestein (z.B. Granit), in welchem kinematisch massgebende Strukturen oft klarer definiert sind, zuverlässiger als in stark zerklüftetem Gestein wie beispielsweise Bündnerschiefer (Brideau et al., 2009), da die kinematische Analyse auf der Annahme beruht, dass sich mögliche Felsstürze entlang persistenter Diskontinuitäten ablösen.

Eine grosse Unsicherheit besteht hinsichtlich der Volumenberechnung eines möglichen Fels- oder Bergsturzes. Das Volumen eines möglichen Ereignisses ist schwierig vorherzusagen und in vielen Fällen ist damit zu rechnen, dass ein instabiles Volumen in zeitlich getrennten Teilen abstürzen wird. Dies hat einen grossen Einfluss auf die berechneten Auslaufweiten und die damit überstrichenen Schadenpotenziale.

Die Validierung der Methodik anhand von Feldaufnahmen an ausgewählten Standorten und anhand bekannter Felssturzereignisse aber auch die hohen Risikohinweise bekannter Instabilitäten im Kanton Wallis deuten darauf hin, dass die Methodik plausible Ergebnisse liefert. Insgesamt erlaubt die gewählte Bearbeitungstiefe eine Priorisierung von Standorten, sie ersetzt aber keine detaillierten Untersuchungen einzelner Standorte im Feld.

5 Schlussfolgerung

Mithilfe eines iterativen Verfahrens konnten für den Kanton Wallis in Gebieten mit warmem und daher besonders instabilitätsanfälligem Permafrost 89 potenziell instabile kritische Felswände ermittelt und plausibilisiert werden. Damit wurde gezeigt, dass es möglich ist, potenzielle Gefahrenquellen aus Permafrostgebieten räumlich so gut einzugrenzen, dass die verbleibende Liste an riskanten Geländeabschnitten im Vergleich zur Grösse des Untersuchungsgebietes äußerst gering erscheint. Diese Anzahl der Risiko-Standorte ist überschaubar, sodass sie praktikabel in das Naturgefahrenmanagement eingearbeitet werden kann und eine wertvolle regionale Übersicht liefert. Neben zahlreichen bekannten Instabilitäten werden sich in dieser Liste auch Standorte finden, deren Gefährdungspotential bisher wenig Beachtung fand. Das Bewusstsein für eben diese Standorte zu schaffen war das Hauptziel dieser Arbeit. Die hier vorgestellte Methodik kann problemlos auf andere Gebiete mit vergleichbaren Datengrundlagen übertragen werden. Sie bietet die Basis, um Gefahren und Risiken aus sich im Zuge des Klimawandels erwärmenden Permafrost-Felswänden mit weitergehenden gezielten Massnahmen anzugehen. Allerdings ist dabei nicht zu vergessen, dass grosse Bergstürze auch ausserhalb der Permafrostgebiete oder in Gebieten mit kälterem Permafrost auftreten können.

Danksagung

Die Autorenschaft dankt den Zuständigen des Bundesamts für Umwelt und der kantonalen Dienststelle Naturgefahren des Kantons Wallis für die zielführende Zusammenarbeit und finanzielle Unterstützung, die zur Entwicklung des vorliegenden Projekts beigetragen hat.

Der Dank geht auch an alle MitarbeiterInnen der Firma geoformer igp AG und der WSL, insbesondere an Laura Bindereif und Marc Christen, die im Hintergrund zum guten Gelingen der Studie beigetragen haben.

Literaturangaben

- Brideau, M-A., Yan, M. & Stead, D. 2009: The role of tectonic damage and brittle rock fracture in the development of large rock slope failures. *Geomorphology* 103(1): 30-49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.04.010>.
- Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R., Glover, J., Schweizer, A., Graf, C., Mc Ardell, B., Gerber, W., Deubelbeiss, Y., Feistl, T. & Volkwein, A. 2012: Integral hazard management using a unified software environment: numerical simulation tool 'RAMMS' for gravitational natural hazards.
- CREALP. 2022: Kanton Wallis/Dienststelle Naturgefahren, Centre de recherche sur l'environnement alpin [CREALP]: Überwachungssystem „Guardaval“, Plattform für die Naturgefahrenüberwachung des Kanton Wallis.
- Dade, W & Huppert, HE. 1998: Long-runout rockfalls. *Geology* 26(9): 803-806. doi: 10.1130/0091-7613(1998)026<803:Lrr>2.3. Co; 2.
- Fan, X., Scaringi, G., Korup, O., West, AJ., van Westen, CJ., Tanyas, H., Hovius, N., Hales, TC., Jibson, RW., Allstadt, KE., Zhang, L., Evans, SG., Xu, C., Li, G., Pei, X., Xu, Q. & Huang, R. 2019: Earthquake-Induced Chains of Geologic Hazards: Patterns, Mechanisms, and Impacts. *Reviews of Geophysics* 57(2): 421-503. doi: <https://doi.org/10.1029/2018RG000626>.
- Fischer, L., Amann, F., Moore, JR. & Huggel, C. 2010: Assessment of periglacial slope stability for the 1988 Tschierva rock avalanche (Piz Morteratsch, Switzerland). *Engineering Geology* 116(1-2): 32-43. doi: 10.1016/j.enggeo.2010.07.005.
- Fischer, L., Purves, RS., Huggel, C., Noetzli, J. & Haeberli, W. 2012. On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12(1): 241-254. doi: 10.5194/nhess-12-241-2012.
- Geoformer igp AG, 2018: Gefährliche Gletscher Wallis - Beobachtung und Kategorisierung 2017.
- Girard, L., Gruber, S., Weber, S. & Beutel, J. 2013: Environmental controls of frost cracking revealed through in situ acoustic emission measurements in steep bedrock. *Geophysical Research Letters* 40(9): 1748-1753. doi: 10.1002/grl.50384.
- Gruber, S. & Haeberli, W. 2007: Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 112(F2). doi: 10.1029/2006JF000547.
- Hall, K., Thorn, CE., Matsuoka, N. & Prick, A. 2002: Weathering in cold regions: some thoughts and perspectives. *Progress in Physical Geography* 26(4): 577-603. doi: 10.1191/0309133302pp353ra.
- Jaboyedoff, M., Metzger, R., Oppikofer, T., Couture, R., Derron, M-H., Locat, J. & Turmel, D. 2007: New Insight Techniques to Analyze Rock-slope Relief Using DEM And 3Dimaging Cloud Points: COLTOP-3D Software. In, 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium.
- Jia, H., Xiang, W. & Krautblatter, M. 2015: Quantifying rock fatigue and decreasing compressive and tensile strength after repeated freeze-thaw cycles. *Permafrost and Perigl. Process.* doi: 10.1002/ppp.1857.
- Jonas, T. 2012: Monitoring von Schneewasserressourcen in der Schweiz. Alpine Schnee- und Wasserressourcen gestern, heute, morgen. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL: 7-12.
- Kellerhals, P. & Isler, A., 1998: Lütschberg-Basistunnel: geologische Voruntersuchungen und Prognose. *Geologische Berichte Nr. 22. Landeshydrologie und -geologie*.
- Kenner, R., Bühler, Y., van Herwijnen, A., Stoffel, A., Amann, F., Phillips, M. 2019: Ereignisanalyse Felssturz und Lawine vom 19.3.2019 am Flüela Wisshorn (Davos, Graubünden), SLF-Bericht an das Amt für Wald und Naturgefahren Graubünden.
- Kenner, R., Arenson, LU., Grämiger, L., 2021: Mass Movement Processes Related to Permafrost and Glaciation, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818234-5.00112-7>.
- Kenner, R., Noetzli, J., Hoelzle, M., Raetzo, H. & Phillips, M. 2019: Distinguishing ice-rich and ice-poor permafrost to map ground temperatures and ground ice occurrence in the Swiss Alps. *The Cryosphere* 13(7): 1925-1941. doi: 10.5194/tc-13-1925-2019.
- Krautblatter, M., Funk, D. & Guenzel, F. 2013: Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space. *Earth Surf. Process. Landforms* 38(8): 876-887. doi: 10.1002/esp.3374.
- Phillips, M., Wolter, A., Lüthi, R., Ammann, F., Kenner, R. & Bühler, Y., 2017: Rock slope failure in a recently deglaciated permafrost rock wall at Piz Kesch (Eastern Swiss Alps), February 2014.

- Earth Surface Processes and Landforms 42(3): 426-438. doi: 10.1002/esp.3992.
- Raymond, M., Wegmann, M. & Funk, M., 2003: Inventar gefährlicher Gletscher in der Schweiz. 0374-0056, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- Sosio, R., Crosta, G.B., Chen, J.H. & Hungr, O. 2012: Modelling rock avalanche propagation onto glaciers. Quaternary Science Reviews 47: 23-40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.05.010>.
- swisstopo, 2018: swissALTI3D Das hoch aufgelöste Terrainmodell der Schweiz. Federal Office of Topography swisstopo.
- Voigtlander, A., Leith, K. & Krautblatter, M. 2018: Subcritical Crack Growth and Progressive Failure in Carrara Marble Under Wet and Dry Conditions. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 123(5): 3780-3798. doi: 10.1029/2017JB014956.
- Walter, F., Amann, F., Kos, A., Kenner, R., Phillips, M., de Preux, A., Huss, M., Tognacca, C., Clinton, J., Diehl, T. & Bonanomi, Y. 2020: Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. Geomorphology 351: 106933. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106933>.
- Wieczorek, G.F. & Jäger, S. 1996. Triggering mechanisms and depositional rates of postglacial slope-movement processes in the Yosemite Valley, California. Geomorphology 15(1): 17-31. doi: 10.1016/0169-555X(95)00112-I.
- Wyllie, D.C. & Mah, C., 2004: Rock slope engineering. CRC Press.