

# Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

## A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
<b>Kurztitel:</b>	CAUTION
<b>Langtitel:</b>	Landslides in high-alpine environments – climate change impacts, exposure, and policy implications
<b>Zitiervorschlag:</b>	Zangerl C, Amaichigh M, Drasener F, Echtler P, Fey C, Formayer H, Fuchs S, Gerstner R, Kehl A, Keiler M, Klisho T, Lehner F, Ppathoma-Köhle M, Polderman A, Prandstätter L, Rieder H, Schilcher T, Schlögl M, Schmidt C, Stähle C (2025). CAUTION - Landslides in high-alpine environments – climate change impacts, exposure, and policy Implications, Endbericht, 31 S.
<b>Programm inkl. Jahr:</b>	ACRP 14, 2022
<b>Dauer:</b>	01.01.2023-30.06.2025
<b>KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:</b>	Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Angewandte Geologie
<b>Kontaktperson Name:</b>	Univ. Prof. Mag. Dr. Christian Zangerl
<b>Kontaktperson Adresse:</b>	Peter Jordan-Straße 82 1190 Wien
<b>Kontaktperson Tel.:</b>	+43-1-47654-87211
<b>Kontaktperson E-Mail:</b>	christian.j.zangerl@boku.ac.at
<b>Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):</b>	Österreichische Akademie der Wissenschaften Institut für interdisziplinäre Gebirgsforschung (IGF) 6020 Innsbruck, Innrain 25, Tirol
<b>Schlagwörter:</b>	Klimawandel, gravitative Massenbewegungen, räumlich-zeitliche Expositions-dynamik, partizipative Einbindung von Akteuren
<b>Projektgesamtkosten:</b>	€ 297.390
<b>Fördersumme:</b>	€ 297.390
<b>Klimafonds-Nr:</b>	KR21KB0K00001
<b>Erstellt am:</b>	30.09.2025

## B) Projektübersicht

### 1 Kurzfassung

Das Projekt CAUTION befasst sich mit gravitativen Massenbewegungen in Festgesteinen (Steinschlag, Fels- und Bergstürze, Felsgleitungen), die durch den Klimawandel begünstigt oder verursacht werden und die durch diese Naturgefahren verursachten Risiken für Gemeinden und Infrastruktur. Die katastrophale neun Millionen Kubikmeter große Eis-Fels-Lawine in Blatten (Schweiz) im Mai 2025 hat eindrucksvoll gezeigt, wie wichtig interdisziplinäre Forschung zu diesen Prozessen unter sich ändernden klimatischen Bedingungen ist. Gravitative Massenbewegungen, die durch Faktoren wie extreme Niederschläge und Schneeschmelze, Temperaturschwankungen mit Frost-Tau-Zyklen, Gletscherrückgang und auftauender Permafrost in ihrem Verhalten beeinflusst werden, dürften aufgrund des Klimawandels häufiger und in ihrer Intensität stärker werden. Trotz Fortschritten in der Naturgefahrenforschung bestehen weiterhin Wissenslücken hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf gravitative Massenbewegungen sowie der Exposition und Vulnerabilität von Siedlungsraum, insbesondere in hoch entwickelten Bergregionen wie den Alpen. Das Projekt zielt darauf ab, diese Lücken zu schließen, indem es natur- und sozialwissenschaftliche Perspektiven integriert, um nachhaltige Risikomanagementstrategien zu entwickeln.

CAUTION hat wichtige Erkenntnisse über die Prozesse von gravitative Massenbewegungen in den österreichischen Alpen geliefert und sich dabei mit den Auswirkungen des Klimawandels durch interdisziplinäre Ansätze befasst. Im Arbeitspaket WP1 wurden die meteorologischen Bedingungen von Steinschlägen und Felsstürzen analysiert und der effektive Wassereintrag, also die Summe aus Schneeschmelze und flüssigen Niederschlägen, als Kernindikator identifiziert. Im Rahmen des Arbeitspaketes WP2 wurde ein umfassendes regionales Inventar von Sturzereignissen mit etwa 2000 Ereignissen in den Stubai- und Ötztalern aufgebaut. Die Daten zeigen eine starke Häufung von Ereignissen in Gebieten, die von auftauendem Permafrost und Gletscherrückgang betroffen sind. Die Anwendung fortschrittlicher in situ-Untersuchungen, Fernerkundungsmethoden und numerischen Modellierungen lieferte Erkenntnisse über die Ursachen, die Kinematik und die Auslösefaktoren von tiefgründigen Felsgleitungen. Das Arbeitspaket WP3 beinhaltet den Aufbau eines neuen In-situ-Felslabor am Stubai-er Gletscher, das die langfristige Überwachung von geklüfteten Felsflanken in einem Gebiet mit auftauendem Permafrost und Gletscherrückgang ermöglicht. Im Felslabor wurden Instrumentierungen (Temperatursensoren, Rissmeter) durchgeführt, um die zeitliche Entwicklung der Temperaturen sowie Deformationen des Gebirges (Fels) kontinuierlich zu messen. Zusätzlich wurden episodisch Fernerkundungsmethoden wie Drohen zur Aufnahme von hochauflösenden Luftbildern und Thermal-Wärmebildern sowie terrestrisches Laserscanning eingesetzt, und die Veränderungen des Geländes und die räumliche Verteilung der Temperaturen zu erfassen.

sen. Im Arbeitspaket WP4 wurden die räumliche und zeitliche Entwicklung gefährdeter Gebäude über einen Zeitraum von 100 Jahren in Tirol analysiert, Hotspots der Siedlungsentwicklung identifiziert und zukünftige Anpassungsstrategien unterstützt. Im Rahmen des Arbeitspaketes WP5 wurden Akteure mittels Workshops in ausgewählten Gemeinden einbezogen und lokale Bedürfnisse wie verbesserte Überwachungssysteme, Wissenstransfer und maßgeschneiderte Risikomanagementstrategien identifiziert, während wir gleichzeitig die Zusammenarbeit zwischen wissenschaftlichen Partnern und lokalen Gemeinschaften gefördert haben. Der abschließende Workshop in Innsbruck erleichterte die Verbreitung der Projektergebnisse und förderte deren Integration in einen lokalen Governance- und Politikrahmen.

Mit Blick auf die Zukunft strebt CAUTION an, seine Erkenntnisse weiter in lokale Maßnahmen zu integrieren und gleichzeitig Wissenslücken in Bezug auf klimabedingte gravitative Massenbewegungen und deren Auswirkungen zu schließen. Durch die Förderung der Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern, politischen Entscheidungsträgern und Gemeinden soll das Projekt die praktische Anwendbarkeit seiner Ergebnisse sicherstellen und langfristige Anpassungsstrategien angesichts des fortschreitenden Klimawandels unterstützen.

## 2 Executive Summary

The CAUTION project addresses landslides in rocks (rock fall, rock avalanches, rock slides) in the Alpine region, driven by climate change, which poses risks to communities and infrastructure. The catastrophic 9 Mio m<sup>3</sup> large ice-rock avalanche in Blatten in Switzerland in May 2025, impressively demonstrated the high relevance of interdisciplinary research on landslide processes under a changing climate. Landslides, triggered by factors such as extreme precipitation and snowmelt, temperature fluctuations with frost-thaw cycles as well as glacier retreat, and permafrost degradation are expected to intensify due to climate change. Despite advancements in hazard research, knowledge gaps persist regarding the impacts of climate change on landslide hazards, exposure, and vulnerability, particularly in highly developed mountain regions like the Alps. The project aims to bridge these gaps by integrating natural and social science perspectives to develop sustainable risk management strategies.

CAUTION has delivered critical insights into landslide processes in the Austrian Alps, addressing the impacts of climate change through interdisciplinary approaches. In Working package WP1 we analysed the meteorological conditions of rock falls and rock avalanches and identified the effective water input, the sum of snow melt and liquid precipitation, as a core indicator. In Working package WP2 we developed a comprehensive regional rock fall and rock avalanche inventory of about 2000 events, revealing strong clustering in areas affected by permafrost degradation and glacier retreat. The application of advanced in situ investigations, remote sensing campaigns and numerical modelling studies provided insights into the causes, kinematics, and triggers of deep-seated rock slides. In

Working package WP3 we established a new In-situ rock slope laboratory at the Stubai Glacier, enabling long-term monitoring of rock slopes in a permafrost and glacier retreat area. The rock laboratory includes episodic laser scanning (ALS, TLS) and UAV measurements of the terrain, complemented by instrumentation within the rock mass such as temperature sensors and crack deformation devices. In Working package WP4 we analysed the spatial and temporal development of elements at risk, such as buildings, over a 100-year period in Tyrol, identifying settlement development hotspots and supporting future adaptation strategies. In Working package WP5 we engaged stakeholders through workshops in selected municipalities, identifying local needs such as improved monitoring systems, knowledge transfer, and tailored risk management strategies, while fostering collaboration between scientific partners and local communities. The final workshop in Innsbruck facilitated the dissemination of project results and promoted their integration into local governance and policy frameworks.

Looking ahead, CAUTION aims to further integrate its findings into local actions, while continuing to address knowledge gaps in climate-driven landslide processes and their impacts. By fostering collaboration between scientists, policymakers, and communities, the project seeks to ensure practical applicability of its results and support long-term adaptation strategies in the face of ongoing climate change.

### 3 Hintergrund und Zielsetzung

Gravitative Massenbewegungen treten in verschiedenen geologischen Umgebungen auf und können durch Triggerfaktoren wie z.B. extreme Niederschläge, Schneeschmelze und Temperaturschwankungen ausgelöst werden. In den Alpen verursachen gravitative Massenbewegungen jedes Jahr Todesfälle und erhebliche wirtschaftliche Verluste und stellen eine anhaltende Bedrohung für Gemeinden und Infrastruktur dar. Es wird erwartet, dass der Klimawandel diese Gefahren noch verstärkt, da steigende Temperaturen die Häufigkeit und das Ausmaß von gravitative Massenbewegungen beeinflussen können. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Entstehung und Dynamik von gravitative Massenbewegungen ist jedoch noch nicht umfassend erforscht. Diese Wissenslücke ist besonders kritisch für europäische Bergregionen, die sehr empfindlich auf den Klimawandel reagieren. Trotz Fortschritten in der Gefahrenerkennung und -beurteilung sind die Erfolge bei der Minderung und Anpassung an Gefahren in Bergregionen z.T. begrenzt. Eine zentrale Herausforderung liegt in der Trennung von naturwissenschaftlicher Forschung und sozioökonomischen Studien sowie in der begrenzten Integration der Ergebnisse in politische Rahmenbedingungen. Studien zur Vulnerabilität haben sich oft auf weniger entwickelte Regionen konzentriert, sodass es an Forschungsarbeiten zu Anpassungsstrategien für hoch entwickelte Länder mangelt. In den Alpen sind sehr rasche gravitative Massenbewegungen wie Steinschläge, Fels- und Bergstürze aufgrund ihres zerstörerischen Potenzials besonders besorgniserregend. Die Eis-Felslawine vom Kleinen Nesthorn in der

Schweiz, die sich Ende Mai 2025 ereignete und zur fast vollständigen Zerstörung der Siedlung Blatten führte, hat das katastrophale Potenzial extrem schneller großräumiger Massenbewegungen eindrucksvoll demonstriert. Solche Ereignisse und ihre Prozesse werden z.T. durch klimabezogene Faktoren beeinflusst, darunter Gletscherrückgang, auftauender Permafrost und extreme Wetterereignisse. Kaskadenprozesse, wie der Übergang von Felsgleitungen zu weitreichenden Felslawinen, können Gefahren verstärken und zu katastrophalen Ereignissen führen. Historische Fallbeispiele, aber auch eine merkliche Häufung aktueller Ereignisse von Felslawinen im Hochgebirge, verdeutlichen das Potential, das diese Prozesse auf Siedlungen und Infrastruktur haben können. Das Fehlen umfassender Expositionsbewertungen und Szenarioentwicklungen für zukünftige Risiken erschwert das Gefahrenmanagement zusätzlich. Die Bewältigung dieser Herausforderungen erfordert interdisziplinäre Ansätze, die Natur- und Sozialwissenschaften integrieren, um nachhaltige Politik und Entscheidungsfindung zu ermöglichen.

CAUTION befasste sich mit Wissenslücken im Bereich gravitativer Massenbewegungen, indem es klimatische, geologische und sozioökonomische Perspektiven integrierte. Ein wesentliches Ziel war es, spezifische meteorologische Bedingungen zu identifizieren, die als primäre Auslöser für Sturzprozesse in alpinen Gebieten fungierten. Wir untersuchten dabei, ob moderne regionale Klimamodelle diese Auslöser in Bezug auf Häufigkeit und Volumen wiedergeben können. Für Stein- und Blockschlag sowie Felssturzereignisse erstellten wir eine umfassende Ereignisdatenbank und analysierten die zugrundeliegenden Prozesse, Häufigkeit, Ausmaß und Volumen-Auslauf-Beziehungen der letzten Jahrzehnte, wobei der Schwerpunkt auf den Klimafaktoren lag. Ein neues In-situ Felslabor wurde im Hochgebirge aufgebaut, um die Hangprozesse, die durch Gletscherrückgang, auftauenden Permafrost, Temperaturschwankungen und extremen Niederschlägen beeinflusst werden, über lange Zeiträume zu beobachten. Somit erweiterte das Projekt auch das österreichische Permafrost-Überwachungsnetz, um die Datenerfassung zur Stabilität von Felshängen zu verbessern. Bei tiefgründigen sich langsam bewegenden Felsgleitungen untersuchten wir inwiefern der Klimawandel auf ihre Entstehung, Reaktivierung und Beschleunigung einen Einfluss hat.

Die Expositionspfade im Siedlungsraum wurden mit geostatistischen Werkzeugen analysiert und quantifiziert, um die räumlich-zeitliche Dynamik auf lokaler und regionaler Ebene zu verstehen. Szenario-basierte Ansätze prognostizierten die zukünftige Exposition, indem sie Veränderungen bei Gefahrenauslösern, Gefahren-Dynamiken und sozioökonomischen Faktoren integrierten. Die Einbindung von Interessengruppen war ein zentraler Bestandteil dieses Projektes, wobei strukturierte Konsultationen und Workshops dazu dienten, Ideen und Vorschläge zu Minderungs- und Anpassungsstrategien zu sammeln. Transdisziplinäre Methoden stellten die praktische Relevanz der vorgeschlagenen Maßnahmen sicher und förderten die Zusammenarbeit mit lokalen und regionalen Akteuren. Zwischenergebnisse wurden den Interessengruppen und der Öffentlichkeit online zugänglich

gemacht, um Transparenz und Wissensverbreitung zu gewährleisten. Letztendlich lieferte das Projekt umsetzbare Erkenntnisse für ein nachhaltiges Gefahren- und Risikomanagement in der Alpenregion.

## 4 Projektinhalt und Ergebnisse

### Erstellung und Analyse einer Ereignisdatenbank für Sturzprozesse

Ein wesentliches Ergebnis des Projekts CAUTION ist die Erstellung einer Ereignisdatenbank sowie eine Bestandsaufnahme zu Steinschlägen und Felsstürzen. Diese konzentrieren sich auf die räumliche Verteilung von Ereignissen oberhalb der Baumgrenze in den Stubai- und Ötztaler Alpen sowie Teile des Silvrettagebirges (Tirol, Österreich). Das definierte Untersuchungsgebiet, das als Grundlage für unsere räumlichen Analysen dient, ist in Fey et al. 2025 in Abbildung 1 dargestellt. Es erstreckt sich über ein größeres Gebiet mit Höhenlagen von 1.500 bis 3.700 m und umfasst eine Fläche von 1.350 km<sup>2</sup>. Die aktuellen Ergebnisse dieser Untersuchung und Analyse wurden von Fey et al. im Jahr 2025 veröffentlicht.

Die Sturzprozesse wurden mithilfe eines automatisierten Vorabklassifizierungsansatzes und einer manuellen Überprüfung der erkannten Ereignisse auf der Grundlage digitaler Oberflächenmodelle (DSMs) identifiziert, die aus Laserscanning-Datensätzen (ALS) und Orthobildern aus den Jahren 2006 und 2017 abgeleitet wurden. Um den Einfluss des Permafrosts zu bewerten, wurde die mittlere jährliche Bodentemperatur (MAGT) anhand einer vereinfachten Oberflächenenergiebilanz modelliert, die die Höhe und die Sonneneinstrahlung berücksichtigt. Die Auswirkungen des Gletscherrückgangs in den letzten Jahrzehnten wurden auf Grundlage historischer Gletscherinventare bewertet. Insgesamt wurden 1989 Stein- und Felssturzereignisse mit Volumina zwischen 200 m<sup>3</sup> und 200.000 m<sup>3</sup> identifiziert und validiert (siehe Fey et al. 2025, Abbildung 7).

Bemerkenswert ist, dass 76 % der Sturzereignisse in Gebieten mit einer MAGT unter 0 °C auftraten, die nur 22 % der potenziellen Abbruchgebiete ausmachen (siehe Fey et al. 2025, Abbildung 8). Darüber hinaus ereigneten sich 40 % der Ereignisse in Gebieten, die seit 1969 eisfrei sind und nur 4,7 % des Untersuchungsgebiets umfassen. Die Ergebnisse stimmen mit veröffentlichten lokalen Ereignisinventaren überein, die sich auf einzelne Felswände oder Gletscherkare konzentrieren (Hartmayr et al. 2020). Es ist zu erwähnen, dass diese Studie das erste umfassende regionale Inventar von Ereignissen für ein großes, klar definiertes Gebiet in den Ostalpen darstellt und eine starke Häufung von Ereignissen in Permafrost- und Gletscherrückzugsgebieten zeigt.

Der Medianwert des Volumens der 1989 erfassten Sturzprozesse beträgt 507 m<sup>3</sup>. Die Analyse der Volumina zeigt eine Volumen-Häufigkeits-Beziehung mit einer kumulativen Häufigkeitsverteilung, die einem Potenzgesetz mit einem Exponenten von  $V=0,8$  folgt (siehe Fey et al. 2025, Abbildung 6). Kleinere Ereignisse dominieren in der Häufigkeit, wobei die kumulative Häufigkeit mit zunehmendem

Volumen stark abnimmt. Größere Ereignisse sind zwar seltener, tragen aber weiterhin erheblich zur Gesamtverteilung des Volumens bei. Rund drei Viertel aller Standorte weisen ein Volumen zwischen 200 und 1.000 m<sup>3</sup> auf. An 42 Standorten wurde ein Volumen von 10.000 m<sup>3</sup> überschritten, und an sieben Standorten wurde ein Volumen von mehr als 100.000 m<sup>3</sup> festgestellt, wobei das maximale Volumen 194.500 m<sup>3</sup> betrug.

### Einfluss meteorologischer Faktoren auf die Entstehung von Felsstürzen

Um den Einfluss meteorologischer Faktoren auf die Entstehung von Felsstürzen mit einem Volumen von mindestens 40.000 m<sup>3</sup> zu untersuchen haben wir den Zeitraum von zwei Wochen vor dem Ereignis hinsichtlich der täglichen Mindest- und Höchsttemperaturen, des effektiven Wassereintrags (EWI) und der Schneedecke untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass bei acht von 12 Ereignissen zum Zeitpunkt des Ereignisses eine Schneedecke mit mehr als 30 kg/m<sup>3</sup> Schneewasseräquivalent vorhanden war (Abbildung 1).

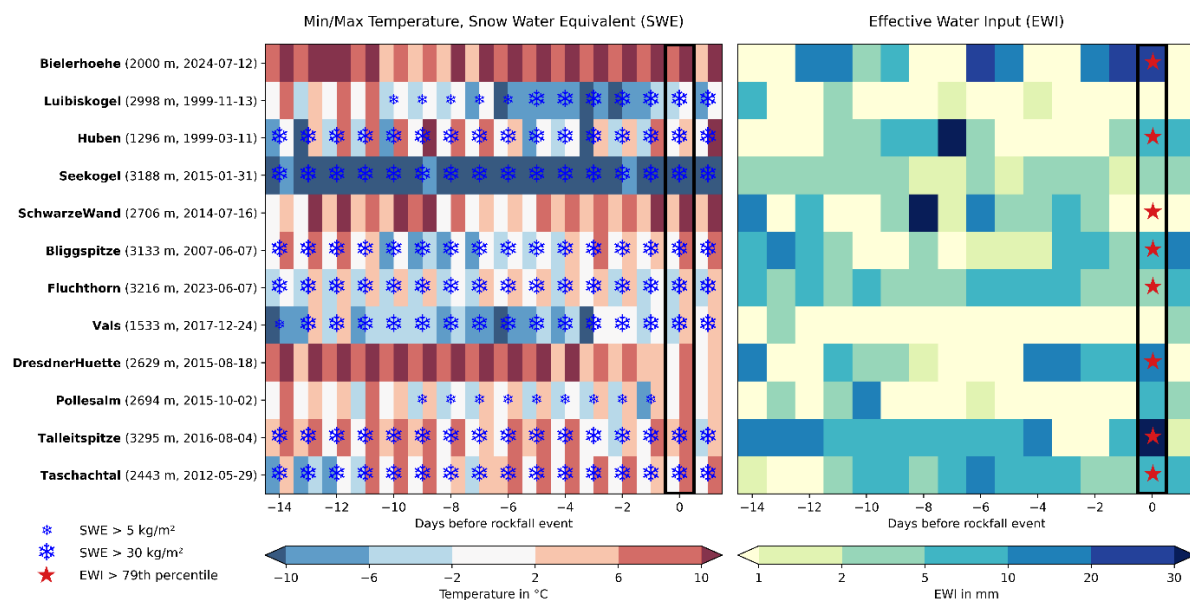


Abbildung 1. Wetterbedingungen während der 14 Tage vor dem Felssturzereignis für minimale und maximale Tagestemperaturen sowie Schneebedeckung (links) und den effektiven Wassereinput (rechts). Bei 75 % aller Ereignisse überschritt der effektive Wassereinput die 79er Perzentile.

Außerdem zeigten acht Ereignisse während des 14-tägigen Zeitraums überdurchschnittlich hohe EWI-Werte, die oberhalb des 79. Perzentils lagen. Daher scheint der EWI ein wesentlicher, jedoch nicht alleiniger Auslösefaktor für Felsstürze zu sein. Basierend auf diesen ersten Erkenntnissen wurde der EWI als Grundlage für einen quantitativen meteorologischen Indikator herangezogen. Es ist jedoch erforderlich, diesen Zusammenhang anhand weiterer Fallbeispiele zu überprüfen.

Hohe EWI-Werte, verursacht durch intensive Schneeschmelze, intensive Niederschläge oder eine Kombination aus beidem, sind die Voraussetzung bei mindestens 75 % unserer Felssturzereignisse. Für weitere meteorologisch-klimatologische Analysen haben wir uns für einen extremen, aber nicht zu extremen Wert entschieden, um robustere Statistiken zu erhalten. Dazu wählten wir ein einjähriges EWI-Ereignis, abgeleitet aus dem Zeitraum 1991-2020. Da verschiedene Prozesse wie intensive Niederschläge durch Gewitter, mehrtägige Niederschläge oder ungewöhnliche mehrtägige Warmperioden in Zeiten mit Schneebedeckung, die zu übermäßiger Schneeschmelze führen, ähnliche EWI-Werte verursachen können, war es nicht möglich, einen quantitativen synoptischen Indikator abzuleiten. Stattdessen haben wir uns darauf konzentriert, anhand von Temperatur- und Niederschlagsdaten aus Klimamodellen tägliche EWI-Werte für verschiedene Höhenlagen zu berechnen, um die Schneebedeckung und Schneeschmelze auf Tagesbasis in verschiedenen Höhenlagen zu ermitteln. Die Ergebnisse sind für das Hochemissionsszenario SSP5-8.5 in Abbildung 2 dargestellt und zusammengefasst.

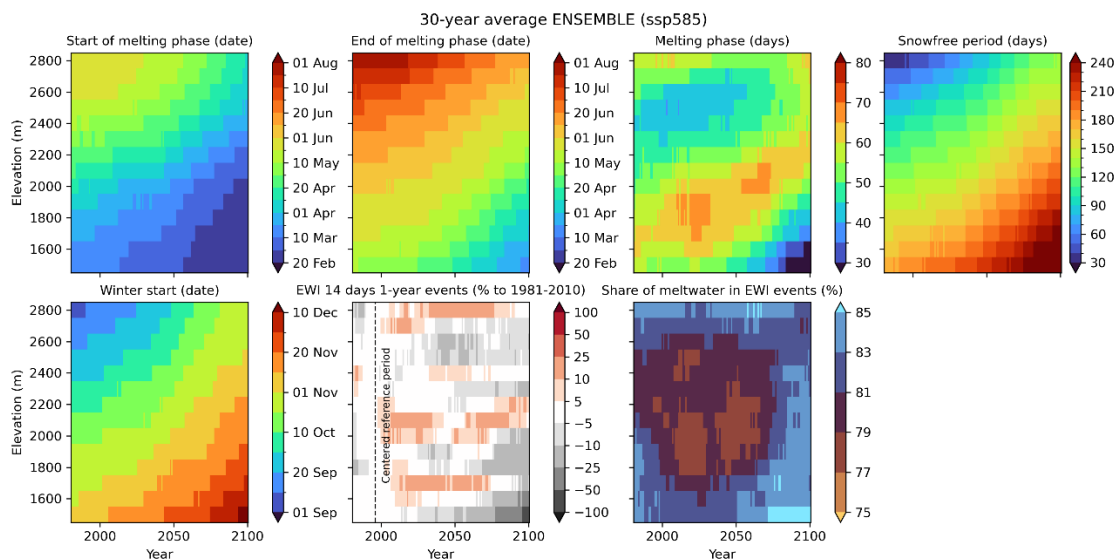


Abbildung 2. Klimawandel-Ensembleprojektionen für das Hochemissionsszenario SSP5-8.5 einschließlich Beginn und Ende der Schmelzphase (oben links), Dauer der Schmelzphase (oben mittig rechts), Dauer der schneefreien Periode (oben rechts), Winterbeginn (unten links), Ein-Jahres-EWI-Ereignisse (unten mittig) und Anteil des Schmelzwassers am EWI (unten rechts). Alle Indikatoren beziehen sich auf den Höhenbereich von 1500 bis 2800 m und den Zeitraum von 1980 bis 2100.

Basierend auf Temperaturschwellenwerten von 7 und 21 Tagen werden Beginn und Ende der Schmelzphase in jeder Höhe zwischen 1500 und 2800 m berechnet, da nur während dieser Phase die Schneeschmelze zum EWI beiträgt. Der Beginn der Schmelze liegt derzeit bei 1500 m in der zweiten Märzhälfte und wird

sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um etwa einen Monat auf die zweite Februarhälfte verschieben. Das Ende der Schmelzphase zeigt eine ähnliche Verschiebung, sodass die Länge der Schmelzphase im 21. Jahrhundert ziemlich konstant bleibt, nur im Bereich unterhalb von 2000 m verringert sie sich deutlich von derzeit etwa 55 Tagen auf weniger als 30 Tage am Ende des Jahrhunderts (siehe Abbildung 2).

Die schneefreie Periode, in der nur flüssige Niederschläge zum EWI beitragen, verlängert sich bis zum Ende des Jahrhunderts in allen Höhenlagen um mehr als zwei Monate, da sich auch der Winterbeginn um mehr als einen Monat verschiebt. Die Auswirkungen des Klimawandels auf das einjährige EWI-Ereignis sind nicht so eindeutig, aber die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die zeitliche Entwicklung in verschiedenen Höhenlagen unterschiedlich sein wird. Nur in den tieferen Lagen zwischen 1500 und 1600 m wird die Wahrscheinlichkeit bis zum Ende des Jahrhunderts um mehr als 25 % zurückgehen, während in der obersten Schicht auf 2800 m ein Anstieg zwischen 10 und 25 % zu verzeichnen ist. Bei allen extremen EWI-Ereignissen trägt die Schneeschmelze mehr als 75 % bei. Interessant ist, dass der höchste Beitrag mit mehr als 80 % in den unteren und obersten Höhenlagen zu verzeichnen ist.

### In-situ Felslabor am Stubaier Gletscher

Im Bereich des Stubaier Gletschers (Felskamm Bildstöcklloch - Eisjoch - Schaufeljoch - Schaufelspitze) wurde ein In-situ Felslabor auf einer Höhe von 2500 bis 3332 m eingerichtet, um Sturzprozesse, Felsgleitungen und Veränderungen des Permafrosts in den steilen durch Gletscherrückzug und Permafrost beeinflussten Felsflanken unterschiedlicher Exposition langfristig zu beobachten (Abbildung 3).

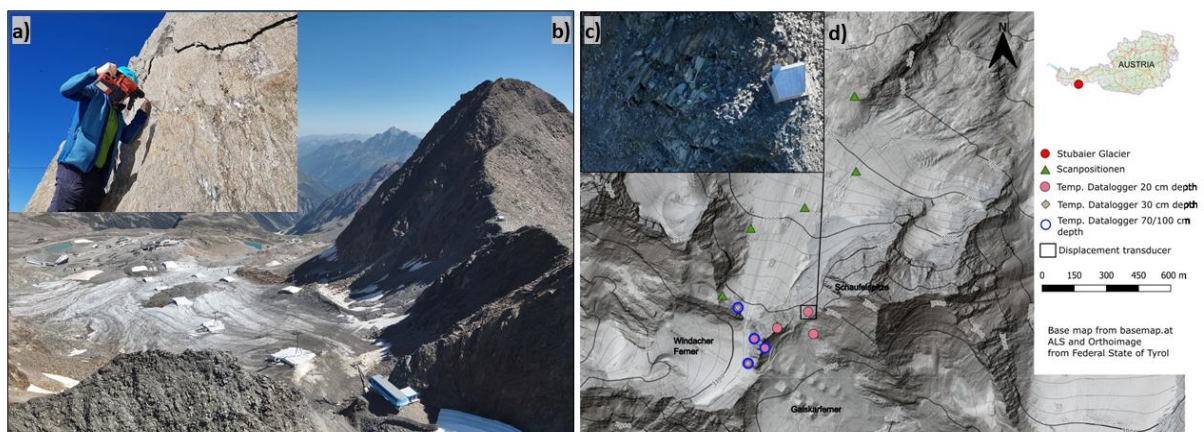


Abbildung 3. Lage des In-situ Felslabors am Stubaier Gletscher in einer Höhenlage von 2500 bis 3332 m, sowie die Lage der Temperatursensoren, Rissmeter, und der TLS-Beobachtungspunkte.

Unsere Initiative zielt darauf ab, Langzeitdaten über die Projektlaufzeit hinaus zu generieren. Das Felslabor ist mit einer Vielzahl von Sensoren zur kontinuierlichen

Messung von Felstemperaturen und Deformationen von Trennflächen ausgestattet und die Felsflanken der Schaufeljoch NW Flanke werden mit einer Webcam kontinuierlich beobachtet. Seit Juni 2025 wurde durch die Stubaier Gletscherbahnen ein neues GBInSAR-System installiert, das das Felslabor mit kontinuierlichen hochauflösenden Messungen der Hangdeformation unterstützt. Zusätzlich erfolgten multi-temporale Fernerkundungskampagnen unter Einsatz von terrestrischem Laserscanning (TLS) und unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) sowie detaillierten geologischen Untersuchungen.

Um den Einfluss des Gletscherrückgangs auf die Entstehung und Häufigkeit von Sturzprozesse zu untersuchen, wurden im Rahmen einer Masterarbeit (Aichinger 2024) die Veränderungen in Fläche, Länge und Breite der Gletscher im Gebiet des Stubaier Gletschers über den Zeitraum von 1869 bis 2021 anhand historischer topographischer Karten und Orthobilder analysiert. Zusätzlich wurden digitale Geländemodelle verwendet, um Volumenverluste zu bestimmen sowie topographische Längs- und Querschnittsprofile zu erstellen. Die Ergebnisse der Gletscherkartierung sind in Abbildung 4 dargestellt und zeigen eine signifikante Beschleunigung des Gletscherrückgangs in den letzten Jahren. Besonders auffällig ist eine deutliche Reduktion der Gletscherflächen im Zeitraum von 2010 bis 2021. Dieser Trend ist insbesondere in Fällen erkennbar, in denen Teile des Gletschers aufgrund der Morphologie des Geländes räumlich vom Hauptgletscher getrennt wurden, was zu einem raschen Eisverlust führte. Ein Beispiel hierfür ist der untere Abschnitt der Zunge des Schaufelferner-Gletschers, der sich zwischen 2016 und 2018 vom Hauptgletscher abtrennte, was innerhalb von nur zwei Jahren zum vollständigen Abschmelzen des unteren Abschnitts führte.

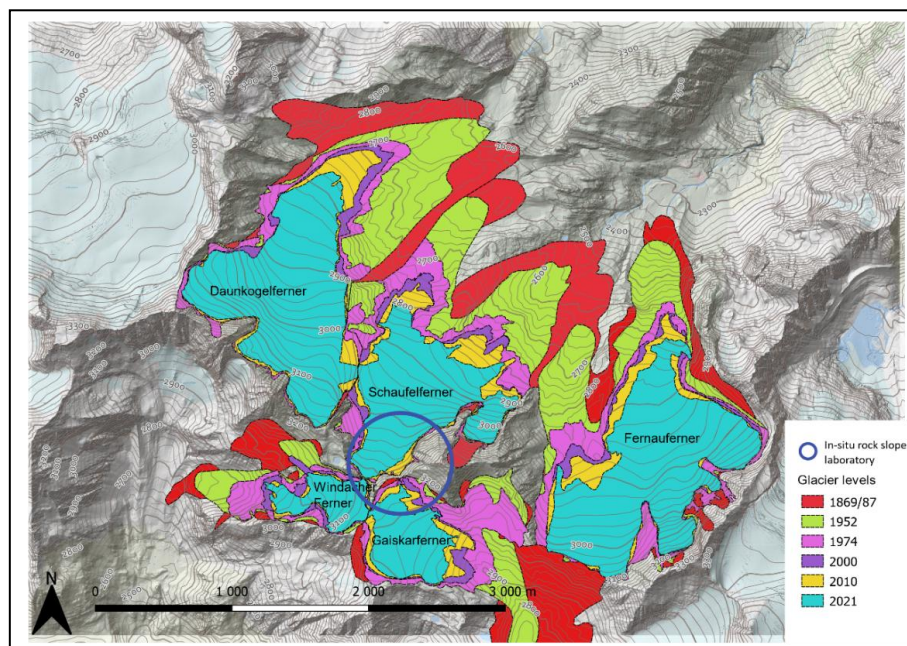


Abbildung 4. Die kartierte Gletscherausdehnung von 1869 bis 2021 zeigt einen massiven Verlust an Eisflächen in der Untersuchungsregion (der blaue Kreis markiert die Lage des In-situ-Felslabors; Aichinger 2024).

Zur Messung der Oberflächentemperatur der Felswände im In-situ Felslabor wurde ein UAV-System, das mit einer Thermal-Wärmebild-Kamera ausgestattet war, getestet. Die im 10. Sept. 2023 gemessene Felsoberflächentemperatur liefert eine deutlich variierende räumliche Temperaturverteilung, die von der Hangorientierung und der Beschaffenheit der Geländeoberfläche beeinflusst wird. Auffällig ist, dass stark aufgelockerter und zerklüfteter Fels sowie Blockschutt höhere Oberflächentemperaturen aufwies, als die umliegenden Bereiche im Festgestein.

Von den 13 installierten Temperatursensoren wurden drei mit unterschiedlicher Hangexposition, d.h. südostexponierter Hang (Azimuth 115°, mittlere jährliche Temperatur +3,87), nordwestexponierter Hang (Azimuth 325°, mittlere jährliche Temperatur - 2,62) und nordostexponierter Hang im Bereich einer Randkluft (Azimuth 115°, mittlere jährliche Temperatur - 0,43 °C) ausgewählt und im Detail analysiert. Die Analysen einer zwei Jahre dauernden Messreihe der Felstemperaturmessungen in 0,20 m Felstiefe zeigen, dass die jährlichen Temperaturschwankungen weitgehend unabhängig von der Hangorientierung sind und etwa 15 °C betragen (Abbildung 5). Der jährliche mittlere absolute Temperaturwert ist jedoch erwartungsgemäß am südostexponierten Hang bei gleicher Seehöhe etwa 6,5 °C wärmer. Anders verhält es sich bei der täglichen Temperaturschwankung. Hier erreicht der südostexponierte Hang eine Amplitude von etwa 5 °C über das gesamte Jahr und etwa 6 °C während der schneefreien Zeit (Juli, August, September). Der nordwestexponierte Hang erreicht hingegen auf Jahresbasis nur eine Amplitude von etwa 1 °C und während der schneefreien Zeit etwa 2 °C. Deutlich stabiler ist das Temperaturregime in der Nähe der Randkluft des Gletschers. Hier beträgt die jährliche Temperaturschwankung etwa 1 °C, und es existiert keine tägliche Temperaturschwankung.

Die Sturzprozessaktivität an den nordwestlichen Hängen der Schaufelspitze wurde mithilfe von multi-temporalen terrestrischen Laserscanning-Daten (TLS) und luftgestützten Laserscanning-Daten (ALS) erfasst (Abbildung 6). Die Analyse umfasste ALS-Messungen aus den Jahren 2006 und 2017 sowie neue TLS-Messungen aus den Jahren 2023, 2024 und 2025. Eine hohe Sturzprozessaktivität wurde generell während der Sommermonate beobachtet, was mit dem Fehlen einer Schneedecke und erhöhten Temperaturen zusammenfällt. Ein Trend zunehmender Aktivität im Laufe der Zeit wurde identifiziert.

Die größten Sturzprozessereignisse im Zeitraum 2006–2017 erreichten Volumina von etwa 7.500 m<sup>3</sup> bzw. 2.000 m<sup>3</sup>. Besonders bemerkenswert sind die beiden großen Felssturzereignisse im Juli und Sept. 2024, die durch das plötzliche Versagen einer langfristig aktiven Felsgleitung ausgelöst wurden und ein Gesamtvolumen von etwa 10.000 m<sup>3</sup> erreichten. Darüber hinaus wurden während des Untersuchungszeitraums weitere bedeutende Sturzprozessereignisse mit Volumina von 2.700 m<sup>3</sup> und 4.500 m<sup>3</sup> in den Jahren 2023 bis 2024 registriert. Die hohe Anzahl von Steinschlagereignissen unterschiedlicher Größe stützt die Hypothese

eines Rückgangs der Stabilität (Gebirgsfestigkeit) von oberflächennahen Gesteinsspaketen („Active Layer“), der durch das Auftauen von Permafrost und den Rückgang der Gletscher verursacht wird.

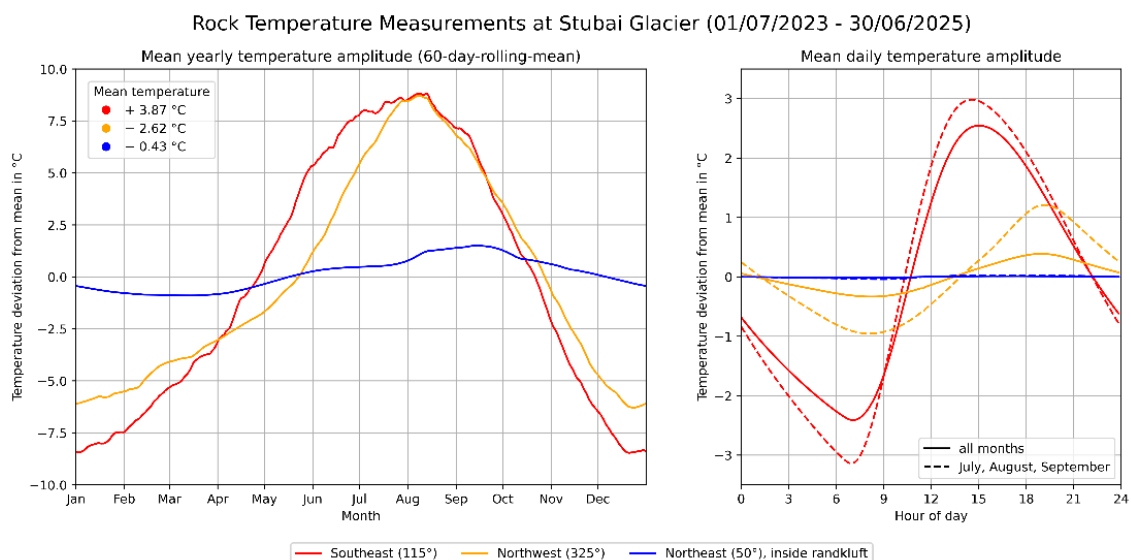


Abbildung 5. Amplitude der jährlichen (links) und täglichen (rechts) Temperaturschwankung im Fels auf einem nordwestexponierten (orange), südostexponierten (rot) und nordostexponierten Hang innerhalb einer Randkluft (blau).

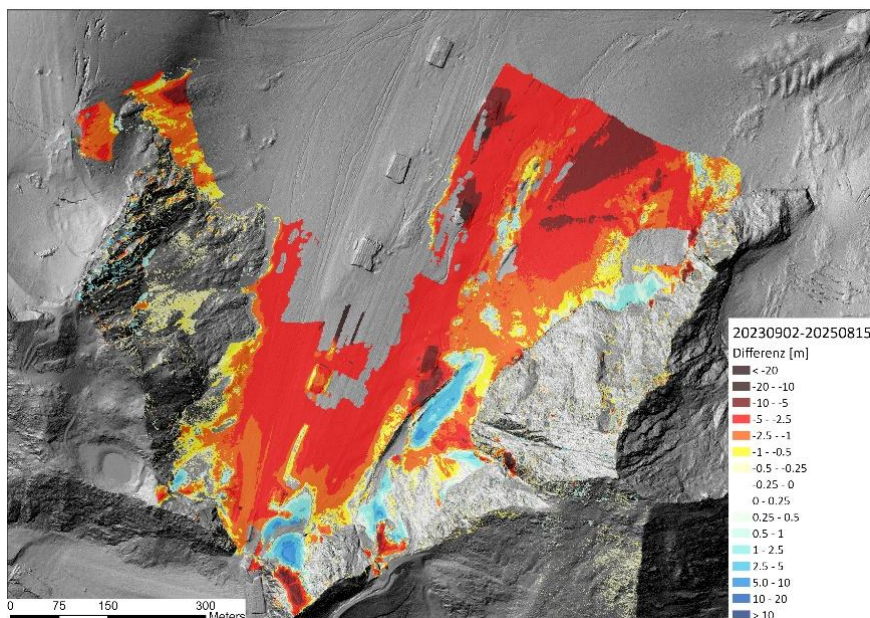


Abbildung 6. Durch TLS-Messungen erfasste topographische Geländeänderungen am In-situ Felslabor zwischen September 2023 und August 2025 weisen auf hohe Sturzprozessaktivität an den Felsflanken hin. Bedeutende negative Oberflächenveränderungen im flachen Gelände sind hauptsächlich auf das Abschmelzen des Gletschers zurückzuführen, wobei lokal Höhenänderungen von über 10 m gemessen wurden.

## Aufbau, Kinematik und Deformationsverhalten ausgewählter tiefgründiger Felsgleitungen

Für ausgewählte Felsgleitungen wurden geologische Modelle neuentwickelt, bestehende verfeinert, sowie die Deformationsgeschichte und das Deformationsverhalten rekonstruiert. Die Felsgleitung Steinlehnen bei Gries im Sellraintal ist in vier Teilschollen mit unterschiedlicher Aktivität (A bis D) unterteilt und erreicht eine Gesamtmächtigkeit von etwa 60 bis 70 m (Abbildung 7). Ende Juni 2003 kam es im unteren Teil des Hanges zur Bildung der bis zu 20 m mächtigen Teilscholle D (Zangerl et al. 2007). Die hohen Hanggeschwindigkeiten führten zu einer erheblichen Zerlegung des Gebirges und zur Entwicklung sekundärer Steinerschlagprozesse, von denen einige die Straße ins Lüsenstal und Teile des Siedlungsraumes der Gemeinde erreichten. Für die Felsgleitung Steinlehnen wurde ein neues geologisches Modell entwickelt, in das alle verfügbaren Daten der letzten 20 Jahre einfließen. Die Felsgleitung ereignet sich innerhalb einer Gesteinsabfolge bestehend aus Paragneisen, Amphiboliten und granodioritischen Gneisen. Struktureologisch ist das Gebirge durch eine leicht nach Westen abtauchende Schieferung (S289/11) sowie drei Kluftscharen gekennzeichnet. Ein mittelsteil nach Osten (K1 107/55), ein steil nach NNW-SSE streichende (K2 254/87) und eine steil nach ENE-WSW streichende (K3 160/88) Kluftschar führen zu einer ausgeprägten blockigen Zerlegung der Gleitmassen. Im Hauptanrissbereich der Felsgleitung ist eine mit 50° nach Osten einfallende spröde Störungszone (Kataklasit) aufgeschlossen. Die Störungszone und die Kluftschar K1 wurden als struktureologische Schwächezonen identifiziert, die maßgeblich zur ursprünglichen Entstehung der Felsgleitung beigetragen haben.

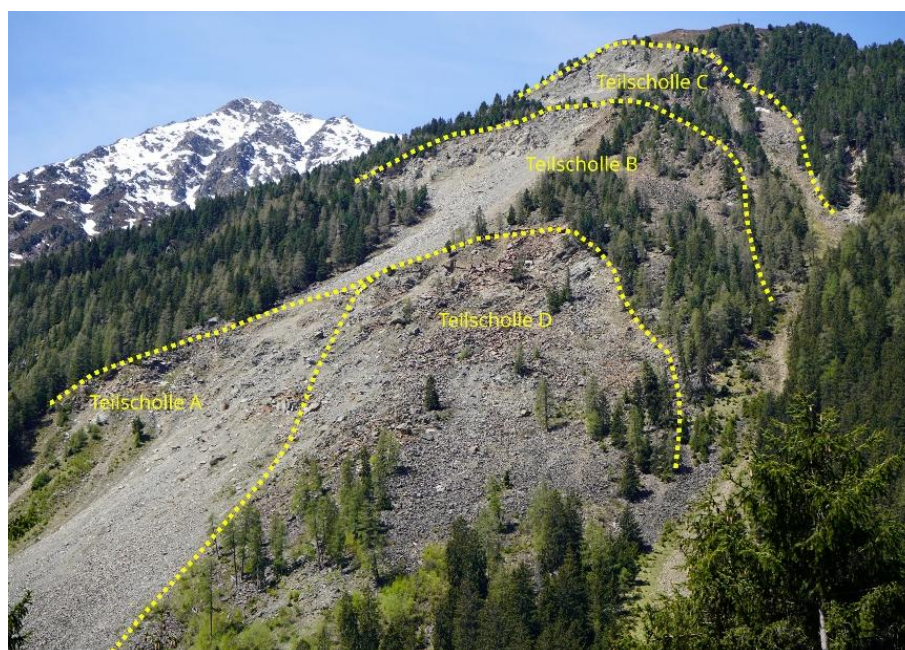


Abbildung 7. Übersicht des Steinlehnen Felsgleitung mit den Anrisszonen der unterschiedlich aktiven Teilschollen A, B, C und D.

Die Felsgleitung Steinlehnen wurde mithilfe eines terrestrischen Laserscanners (TLS), bodengestützter Radarinterferometrie (GBInSAR) und Tachymetermessungen überwacht. Während der Beschleunigungsphase im Juni/Juli 2003 wurden für die Teilscholle D Geschwindigkeiten von bis zu 4 m/Tag aufgezeichnet. Nach einer etwa zweiwöchigen Phase hoher Aktivität begannen die Bewegungen abzunehmen. Im Frühjahr 2004 trat eine weitere Beschleunigungsphase auf, bei der Geschwindigkeiten von bis zu 40 mm/Tag erreicht wurden. Es wurde jedoch ein allgemeiner Trend zur Verlangsamung beobachtet, wobei die Bewegungsraten bis Herbst 2004 auf etwa 0,5 mm/Tag zurückgingen. Zwischen 2005 und 2011 lagen die jährlichen Bewegungsraten unter 200 mm/Jahr. Seit 2011 gibt es eine Lücke in den direkten Messungen; jedoch deuten Aktivitätsschätzungen basierend auf luftgestützten Laserscanning-Daten aus den Jahren 2006 und 2017 auf Verschiebungen im Bereich von 1 bis 3 m für die hochaktive Teilscholle D hin, was einer durchschnittlichen jährlichen Geschwindigkeit von Dezimetern pro Jahr entspricht.

Im Jahr 2021 wurde am Gegenhang ein GBInSAR-System installiert, das kontinuierliche und flächenhafte Messungen mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich ermöglicht; das System ist aktuell noch im Betrieb (Abbildung 8). Die GBInSAR Messungen zeigen die räumliche Verteilung der Verschiebungen für das Jahr 2023, mit den größten Magnituden von >100 mm im zentralen Teil der Teilscholle D.

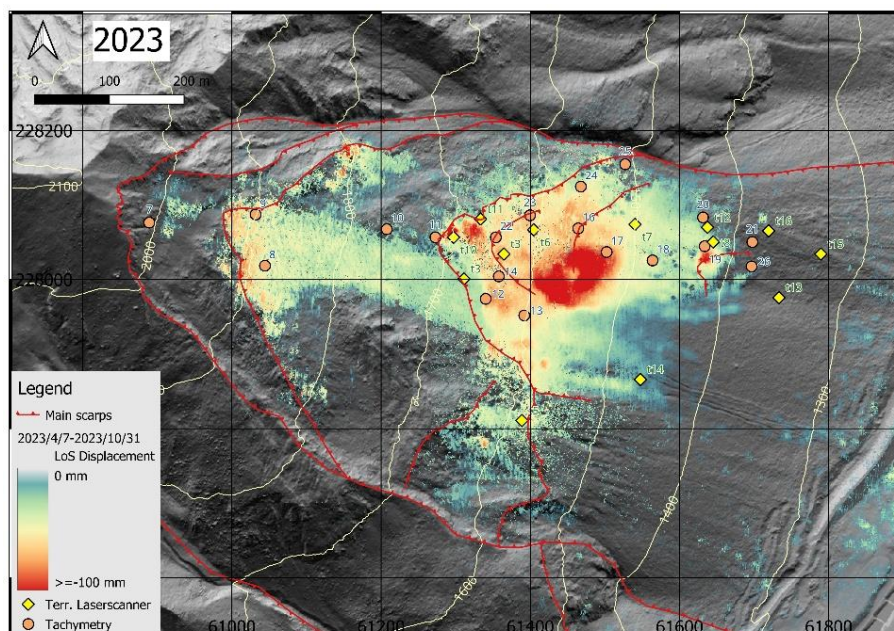


Abbildung 8. GBInSAR-basierte räumliche Deformationen der Steinlehnen Felsgleitung für das Jahr 2023. Die terrestrischen Laserscanning Punkte (gelbe Quadrate) wurden im Jahr 2003 gemessen, und tachymetrische Reflektoren (orange Kreise) wurden episodisch im Zeitraum von 2003 bis 2011 gemessen (Zangerl et al. 2007).

Ein Vergleich der Verschiebungsraten mit meteorologischen Daten zeigt, dass die höchste Korrelation zwischen einem gleitenden 3-Wochen-Mittel der Hanggeschwindigkeit und dem gleichen gleitenden Mittel des effektiven Wassereintrags (EWI) gefunden wurde, jedoch mit einer Zeitverzögerung von einer Woche (Abbildung 9). Im Jahr 2024, während einer Phase hoher Aktivität, wurde ein Korrelationskoeffizient von  $R^2=0,56$  berechnet. Dies deutet darauf hin, dass Niederschlag oder EWI eine gewisse beschleunigende Wirkung auf die Felsgleitung haben, vorausgesetzt der Hang ist aktiv. Während Phasen mit geringer Hangaktivität, wie im Jahr 2025, hat der EWI hingegen jedoch kaum Einfluss auf die Verschiebungsraten. Dies zeigt sich durch einen sehr geringen Wert von  $R^2=0,01$ . Die Ergebnisse verdeutlichen einen zeitlichen Zusammenhang zwischen Regen-/Schneeschnelzereignissen und Beschleunigungsphasen der Teilscholle D.

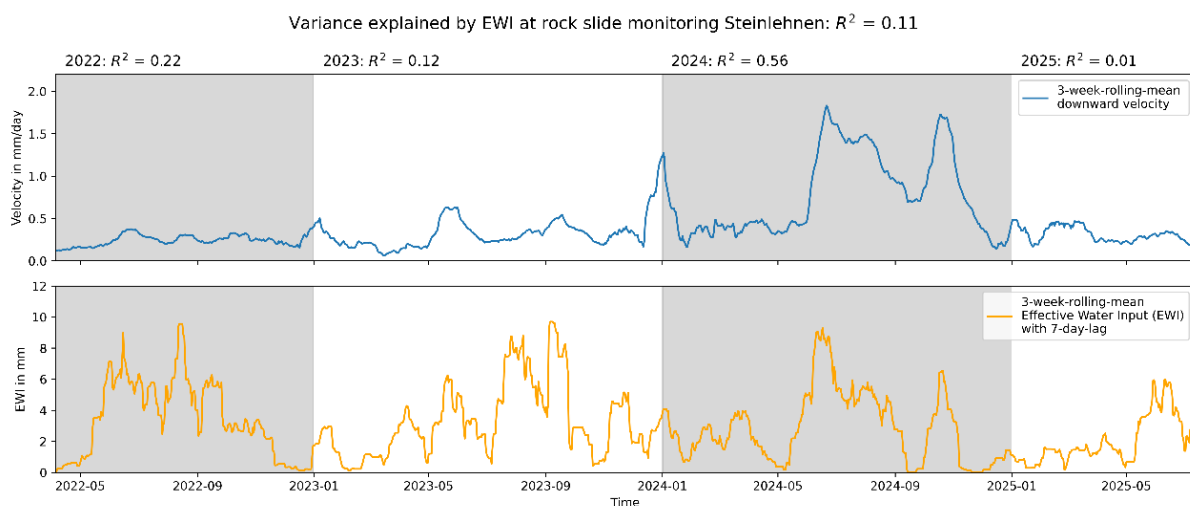


Abbildung 9. Dreiwöchiger gleitender Mittelwert für die Geschwindigkeit der Teilscholle D (oben, blau) und derselbe gleitende Mittelwert für den „effektiven Wassereintrag“ (unten, orange). Im Jahr 2024 erreicht die Korrelation mit einer Woche Zeitverzögerung einen  $R^2$ -Wert von 0,56.

Die Felsgleitung Rauhjoch befindet sich in etwa auf 2900 m Höhe in der hochalpinen Umgebung Südtirols zwischen dem Passeiertal im Süden und dem Seebertal im Norden und erreicht ein Gesamtvolumen von ca. 1 Mill  $m^3$  (Abbildung 10). Die Felsgleitung entstand am nordnordöstlich exponierten Hang der Rauhjochspitz, die während der maximalen Ausdehnung der Kleinen Eiszeit vom Seeber Gletscher bedeckt war. Ähnlich wie bei anderen Fallstudien, beispielsweise die Felsrutschung am Marzellkamm (Rechberger et al. 2021 und 2022;) hat seitdem ein rascher Gletscherrückzug stattgefunden, sodass die Hangflanke heute eisfrei ist. Geologisch befindet sich die Felsgleitung Rauhjoch im Schneeberg-Komplex, der aus metamorphen Gesteinen unterschiedlicher Festigkeit aufgebaut ist. Wir können die zutage tretenden Lithologien in eine alternierende Abfolge von geschie-

fertigen Kalk-Glimmer- und Granat-Schiefern mit geringerer Gesteinsfestigkeit sowie Marmore und Amphibol-reiche Gesteine mit höherer Gesteinsfestigkeit unterscheiden. Auf der Imstspitze westlich des Rauhjochs ist eine Faltenstruktur der Schieferungsebenen sichtbar, die durch flache bis subhorizontale Neigungswinkel der Schieferung im Gipfelbereich und steilere, konstante Neigungen in den Flanken gekennzeichnet ist. Diese Faltenstruktur bestehend aus Lagen mit Glimmerreichen Gesteinen und Marmoren sowie Amphibolit-Schiefern ist auch für das Rauhjoch auf der geologischen Karte sichtbar und im geologischen Profilschnitt dargestellt (siehe Gerstner et al. 2025, Abbildung 5, 6 und 8).

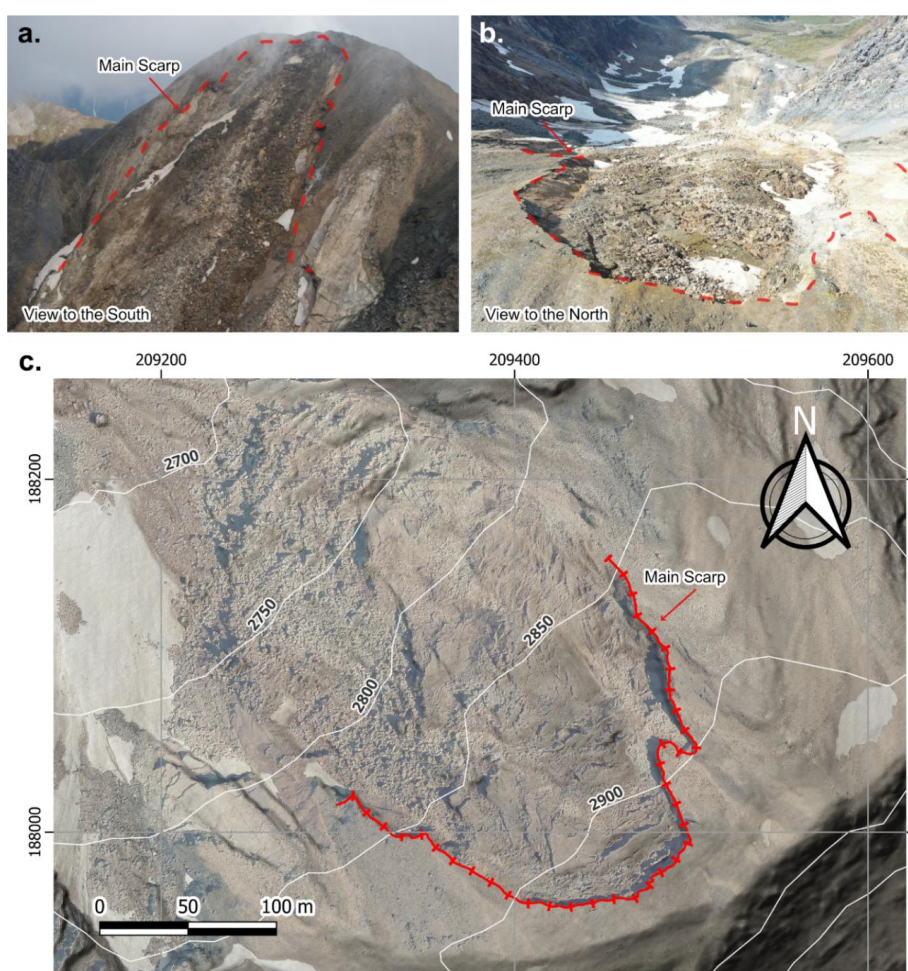


Abbildung 10. Übersicht der Rauhjoch Felsgleitung: a. Helikopteraufnahme von A. Maschler am 9.9.2021; b. UAV-Aufnahme vom 7.9.2021; c. Kartenansicht aus Orthofoto und DTM (Quelle: Autonomen Provinz Bozen, Gerstner 2025).

Die Felsgleitung am Rauhjoch entwickelte sich rückschreitend, wobei ein bedeutendes Ereignis im Jahr 2019 durch das Abgleiten einer großen Felscholle eingeleitet wurde. Eine abrissähnliche Struktur ist bereits im Orthofoto von 1954 im unteren Hangbereich erkennbar und wird als Phase 1 bezeichnet (siehe Gerstner

et al. 2025, Abbildung 5). Das nächste nachweisbare Ereignis ereignete sich zwischen Juni und Juli 2019 und umfasste einen Abbruch von etwa 30.000 m<sup>3</sup>, der zur Phase 2 führte. Phase 3 trat im Dezember 2019 ein, als sich eine Felscholle mit einem Volumen von circa 950.000 m<sup>3</sup> ablöste und abglitt. Der Wirkungsbereich der Felsgleitung vergrößerte sich sukzessive sowohl lateral als auch rückschreitend. Durch den Vergleich von Orthofotos aus den Jahren 2020 bis 2024 konnten weitere Felsabbrüche identifiziert werden, die zur Entwicklung von Phase 4 führten. Die Rekonstruktion der Gletscherausdehnung zeigt, dass während der Kleinen Eiszeit etwa die Hälfte der nordwestlichen Hangflanke des Rauhjochs von einem Gletscher bedeckt war, der mittlerweile vollständig verschwunden ist und zu einer Entlastung des Untergrundes und veränderten hydrogeologischen Bedingungen führte.

Exemplarisch für andere Felsgleitungen, die durch den Gletscherrückzug beeinflusst werden, wird hier die Felsgleitung am Rauhjoch dargestellt. Dabei wird aufgezeigt, wie der Gletscherrückgang die initiale Entstehung der Felsgleitung beeinflusst, insbesondere die Entwicklung einer vollständig persistierenden basalen Scherzone (siehe Gerstner et al. 2025, Abbildung 10). Feldbeobachtungen und darauf aufbauende numerische Modelle mit UDEC (Itasca 2018) und IRAZU (Geomechanica 2024)) zeigten, dass die Felsgleitung am Rauhjoch auf einer nach Norden einfallenden, geringfesten Granat-Glimmerschieferlage entstand; zumindest über einen bestimmten Abschnitt im oberen Hangbereich. Da die Schieferung der Granat-Glimmerschieferlage jedoch nicht am Hangfuß ausbeißt, sondern dort sogar noch steiler einfällt, war es für die Entstehung der basalen Scherzone notwendig, dass sich neue Brüche im Gebirge bilden und vernetzen, d.h. felsmechanische Bruchprozesse, die die Bildung einer sukzessive flacher werdenden basalen Scherzone ermöglichten. Dies konnte jedoch nur durch die Reduktion der Gebirgsspannungen am unteren Hangbereich infolge des Gletscherrückgangs, sowie durch eine verstärkte Auflockerung des Gebirges aufgrund der erhöhten Trennflächendichte erfolgen. Erst nach Bildung der vollständig persistenten basalen Scherzone (Ablösefläche, Gleitzzone) kann sich nun die Felsmasse als Gleitung talwärts bewegen. Durch Entlassungsprozesse im oberen Abschnitt wird dabei rückschreitendes Versagen bis zum Gipfel begünstigt, sodass in Zukunft neue Gesteinspakete abrutschen können. Frische Zerrspalten belegen diesen rückschreitenden Versagensmechanismus.

Die numerischen Modelle zeigen, dass der Gletscher, der 1897 noch die Hälfte des Hanges bedeckte, die Felsflanke zunächst stabilisierte, indem er eine zusätzliche Auflast auf den unteren Teil ausübte und dadurch ein tiefgründiges Versagen verhinderte. Der Klimawandel-bedingte Gletscherrückzug führte zu Spannungsänderungen im Gebirge, verbunden mit der Bildung neuer und Reaktivierung bestehender Trennflächen sowie zu einer Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit des Gebirges. Beobachtungen verbinden das große Abbruchereignis von 2019 mit starkem Schneefall, gefolgt von einer raschen Schneeschmelze, die eine erhöhte Wasserinfiltration verursachte.

Somit zeigen die Modelle, dass das Schmelzen von Gletschereis und die damit verbundenen Entlastungsprozesse in weitere Folge zu bruchmechanischen Prozessen führte, welche die Bildung einer persistierende basale Scherzone begünstigte und folglich ein Versagen ermöglichte. Nachfolgende rückschreitende Versagensprozesse und die in den Jahren 2021 und 2024 beobachteten Zerrspalten konnten ebenfalls numerisch reproduziert werden. Somit verdeutlichen unsere Modelle den Einfluss des Gletscherrückgangs auf die initiale Bildung tiefgründiger Felsgleitungen am Beispiel des Rauhjochs. Auch wenn der Einfluss von auftauendem Permafrost in diesen Modellen noch nicht berücksichtigt wurde, ist anzunehmen, dass dieser zusätzlich die Gebirgsfestigkeit reduziert und somit die Entstehung von Gleitungen begünstigt.

### Raum-zeitliche Expositions-dynamik

In CAUTION wurde eine Analyse der räumlichen und zeitlichen Entwicklung von gefährdeten Elementen durch unterschiedliche Naturgefahrenstypen – einschließlich Hangrutschungen, Steinschlägen, Wildbächen, Flussüberschwemmungen und Schneelawinen – über einen Zeitraum von 100 Jahren im Bundesland Tirol durchgeführt. Die Studie bietet detaillierte, räumlich explizite Einblicke in die Exposition verschiedener Gebäudekategorien durch diese Gefahren, wie Wohngebäude, Gewerbeimmobilien und Beherbergungsbetriebe (z. B. Hotels). Sie untersucht zudem deren zeitliche Entwicklung sowohl in absoluten als auch in relativen Werten (Abbildung 11 und 12).

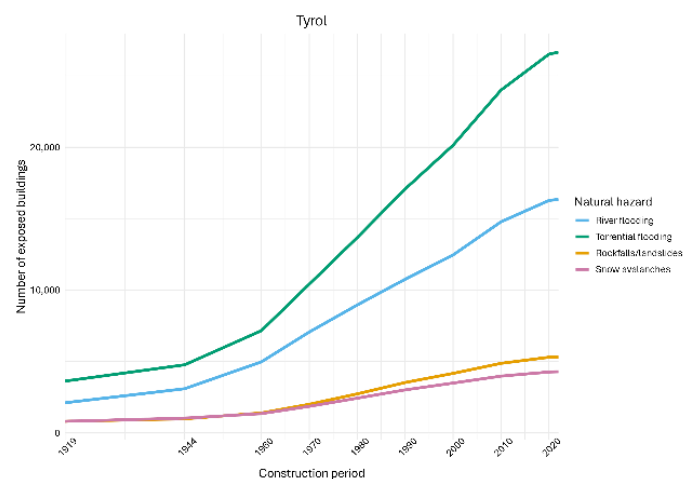


Abbildung 11. Kumulative Anzahl der exponierten Gebäude im Bundesland Tirol, nach verschiedenen Gefährdungstypen.

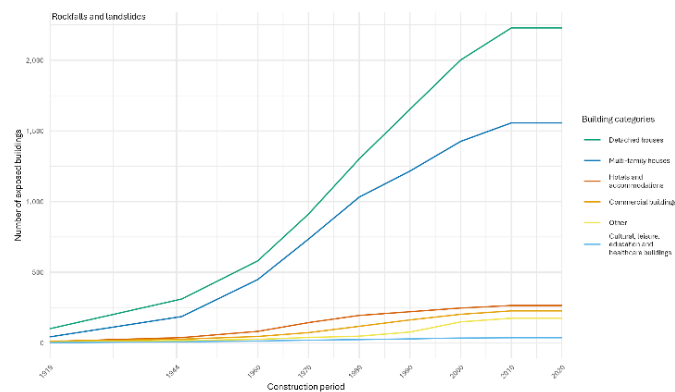


Abbildung 12. Kumulative Anzahl der Gebäude, die Rutschungen und Steinschlägen im Bundesland Tirol ausgesetzt sind; gegliedert nach verschiedenen Gebäudetypen.

Darüber hinaus wurde die jährliche Neubaurate analysiert (Abbildung 13). Auffällig ist, dass die Kategorie der Hotels und ähnlicher Gebäude weiterhin eine beträchtliche Anzahl neu errichteter Gebäude in Gebieten mit Gefährdung durch Hangrutschungen und Felsstürze aufweist, während andere Gebäudekategorien, wie Mehrfamilienhäuser und Gewerbegebäude, einen leicht rückläufigen Trend zeigen. Diese Ergebnisse ermöglichen die Identifikation von Hotspots der Siedlungsentwicklung und bilden, in Kombination mit Projektionen auf Basis der Shared Socioeconomic Pathways (SSP2), eine Grundlage für die Bewertung zukünftiger Trends. Dies unterstützt wiederum die Entwicklung gezielter Anpassungsstrategien, um den zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels entgegenzuwirken.

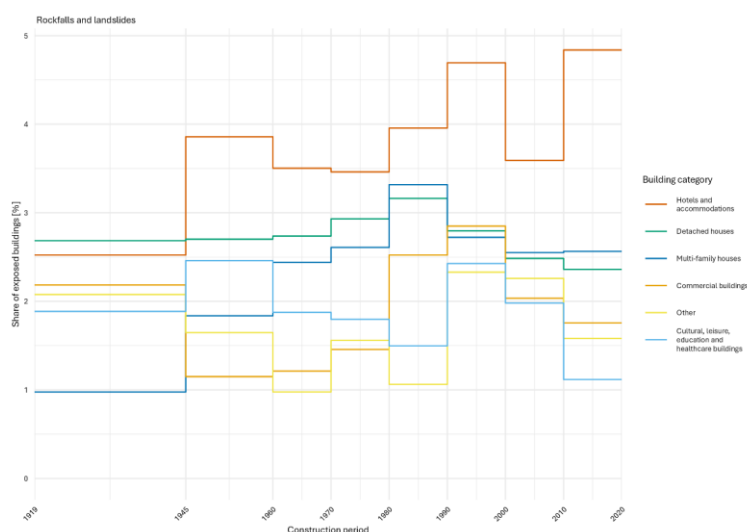


Abbildung 13. Anteil der exponierten Gebäude (Rutschungen und Steinschläge) im Bundesland Tirol, jährliche Neubauten.

Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass das Bundesland Tirol im nationalen Vergleich innerhalb Österreichs nicht die höchsten Werte der Gefährdung durch Hangrutschungen aufweist (Abbildung 14 und 15). Stattdessen positioniert sich Tirol aufgrund der räumlichen Verteilung der gefährdeten Elemente im mittleren Bereich der nationalen Gefährdungsrankings. Diese mittlere Position spiegelt die spezifischen topografischen, siedlungsbezogenen und landnutzungsbedingten Charakteristika der Region wider, die zwar stark von alpinen Naturgefahren beeinflusst werden, jedoch durch eine geringere Bevölkerungsdichte und lokalere Entwicklungsstrukturen im Vergleich zu einigen anderen Bundesländern ausgeglichen werden. Die Analyse verdeutlicht, dass Tirol zwar aufgrund seines gebirgigen Terrains einer Vielzahl von Naturgefahren ausgesetzt ist, die kumulative Gefährdung – gemessen an den betroffenen Vermögenswerten – im Vergleich zu anderen österreichischen Regionen jedoch moderat bleibt.

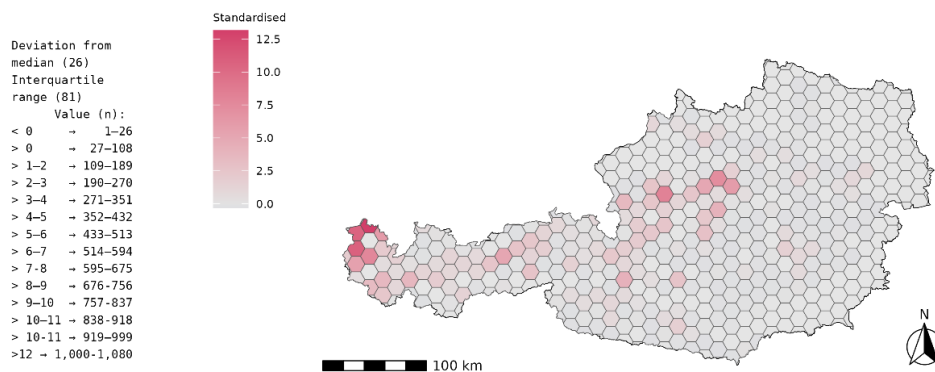


Abbildung 14. Exposition gegenüber Rutschungen und Steinschlägen in Österreich, basierend auf kumulativen Zahlen sowie deren Abweichung vom Median und dem Interquartilsabstand.

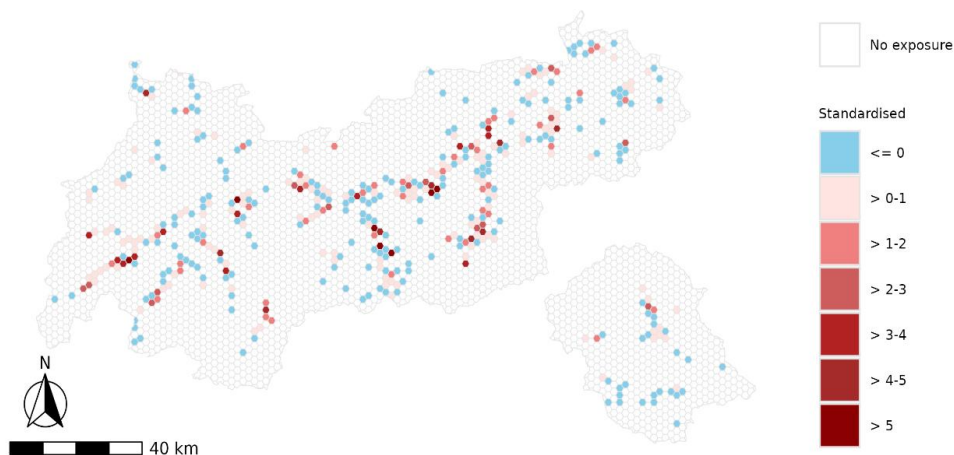


Abbildung 15. Exposition gegenüber Rutschungen und Steinschlägen in Tirol, basierend auf kumulativen Zahlen sowie deren Abweichung vom Median und dem Interquartilsabstand.

## **Partizipative Einbindung von Akteuren auf lokaler und regionaler Ebene**

Die partizipative Einbindung von Akteuren beruht in einem ersten Schritt auf der Identifizierung, Kartierung und Einladung von Akteuren. Eine umfassende Liste relevanter Akteure wurde erstellt und genutzt, um Teilnehmende zu Projektworkshops und der Abschlussveranstaltung einzuladen. Diese Liste wurde während des gesamten Projekts kontinuierlich aktualisiert, um ihre Relevanz sicherzustellen. Darüber hinaus unterstützten die Gemeinden und die KLAR!-Region Kaunertal das Projekt durch die Verbreitung von Einladungen an lokale Akteure für Workshops und Exkursionen über ihre Kommunikationskanäle.

Ein erster Workshop wurde in Gries im Sellrain durchgeführt. Dort wurden zentrale Themen für die weitere gemeinsame Entwicklung identifiziert, darunter der Bedarf an Monitoring-Konzepten und umfassenden Risikomanagementstrategien. Während des Workshops wurden Herausforderungen und Lücken im aktuellen Risikomanagement festgestellt, darunter begrenzte (finanzielle) Ressourcen, mangelnde Kenntnisse zu Naturgefahren, Klimawandel und Anpassungsmaßnahmen, unzureichende Governance-Strukturen aufgrund unklarer Zuständigkeiten und Diskrepanzen zwischen nationalen und föderalen Rahmenbedingungen sowie lokalen Bedürfnissen, Interessen und Ressourcen sowie Unsicherheiten in Bezug auf den Klimawandel und dessen lokale Auswirkungen.

Im Workshop in Kaunerberg wurden zusätzliche Themen von Interesse identifiziert, wie Multigefahrenszenarien, Hitzewellen, Dürre, Waldsterben, Gletscherrückgang und Wasserversorgung. Gesellschaftliche Themen umfassten Lebensqualität, Tourismus, Wirtschaft, Infrastruktur, Mobilität, Landnutzung und Sicherheit. Notwendige Maßnahmen für ein Risikomanagement wurden hervorgehoben, darunter Sensibilisierung, Wissenstransfer, Kommunikation und die Bereitstellung verlässlicher Daten. Ein zentrales Ergebnis war der Ruf nach einem umfassenden, lokal angepassten Konzept für Anpassung und Naturgefahrenmanagement. Ähnliche Herausforderungen und Lücken im aktuellen Risikomanagement wurden wie im Workshop in Gries im Sellrain identifiziert. Die Ergebnisse der beiden Stakeholder-Workshops wurden in einem Multi-Risk-Governance-Konzept visualisiert (Abbildung 16).

Strategien zur Priorisierung und Bewältigung zukünftiger Anforderungen im Risikomanagement, die speziell auf die lokale Ebene und die Bedürfnisse von Entscheidungsträgern zugeschnitten sind, wurden diskutiert. Für Gries im Sellrain besteht das Ziel, auf eine umfassendere Risikomanagementstrategie hinzuwirken. Dabei wird angestrebt, die Möglichkeiten für ein Monitoring-System der Rutschung Steinlehnen zu analysieren, einschließlich der Bewertung der damit verbundenen Vor- und Nachteile sowie der Erstellung von Kostenschätzungen. Zudem ist vorgesehen, eine Reihe von Informationsblättern zu Themen wie Meteorologie, Geologie und Naturgefahrenrisiken in Gries im Sellrain zu entwickeln, um den Zugang zu nutzbaren Daten für lokale Behörden zu erleichtern. Darüber hinaus soll ein Überblick über die verfügbaren Optionen und Maßnahmen erstellt werden, die Gemeinden bei der Bewältigung von Naturgefahrenrisiken und den

Herausforderungen des Klimawandels unterstützen können. Allgemein wurde der Wunsch nach einer engeren Zusammenarbeit zwischen wissenschaftlichen Partnern und lokalen Gemeinschaften geäußert.

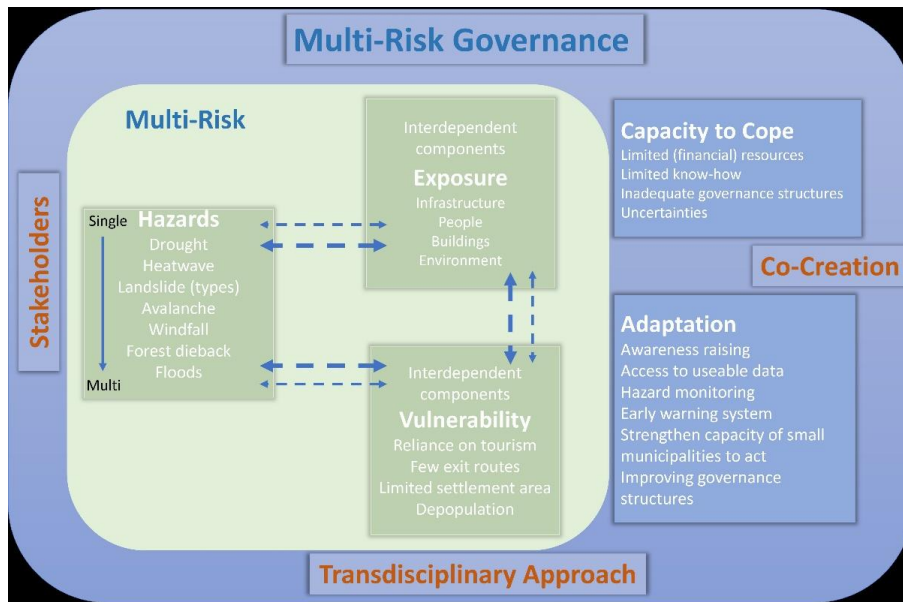


Abbildung 16. Rahmenwerk für Multi-Risiko- Governanz basierend auf den Ergebnissen von Stakeholder-Workshops.

Basierend auf den Ergebnissen des Workshops in der Gemeinde Kaunerberg wurden ähnliche Interessensbereiche identifiziert und diskutiert, mit der Ausnahme, dass keine Forschung zu einem Monitoring-System erforderlich war. Der Workshop und die Diskussionen betonten jedoch die Notwendigkeit, das Bewusstsein für Naturgefahren, Wasserverfügbarkeit und Klimawandel in der lokalen Umgebung zu schärfen. Um diesem Bedarf gerecht zu werden, wurde eine Exkursion zum Felssturzgebiet Wiesenhof und zum Bewässerungssystem angeboten, um mehr über den aktuellen Stand zu erfahren und Geologie, Meteorologie, Wasser, Naturgefahren, mögliche Handlungsoptionen und Visionen zu diskutieren. Am 3. März 2025 fand der Projektabschlussworkshop in Innsbruck statt.

## 5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Erstmals wurde ein umfassendes Inventar von Steinschlag- und Felssturzereignissen für eine große Region in Tirol erstellt, das 1989 Ereignisse umfasst, die zwischen 2006 und 2017 stattgefunden haben. Dieses Inventar bietet eine solide Grundlage für zukünftige Analysen in dieser Region. Unsere Untersuchungen zeigen, dass in Gebieten, die vom Permafrost und Gletscherrückgang betroffen sind, signifikant mehr Sturzprozesse auftreten. Die Daten belegen, dass insbesondere der nordexponierte Sektor oberhalb von 2600 m stark betroffen ist. Bemerkenswert ist, dass 76 % der Sturzprozesse in Gebieten auftraten, die vom Permafrost

beeinflusst sind, obwohl diese nur 22 % der potenziellen Fläche ausmachen. Darüber hinaus ereigneten sich 40 % der dokumentierten Sturzprozesse in Gebieten, die seit 1969 eisfrei sind, obwohl diese lediglich 4,7 % der potenziellen Sturzprozessfläche darstellen. Dies stellt eine enorme Herausforderung für hochalpine Infrastruktur dar. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass die messbare, Klimawandel-bedingte Zunahme von großen Sturzprozessen eine geringere Auswirkung auf Siedlungsgebiete in tieferen Lagen haben.

Basierend auf dem Untersuchungsgebiet von 1.350 km<sup>2</sup>, den 42 Ereignissen mit einem Volumen von mehr als 10.000 m<sup>3</sup> und einem Zeitraum von 11 Jahren ergibt sich eine mittlere jährliche Frequenz von 0,00283 Ereignissen pro km<sup>2</sup> und Jahr. Anders ausgedrückt, würde dies über einen Zeitraum von 100 Jahren etwa 0,283 Ereignisse pro km<sup>2</sup> bedeuten. Anzumerken ist, dass für diese Abschätzung angenommen wurde, dass die Ereignisse im Wesentlichen einphasig waren. Diese Berechnungen verdeutlichen, dass Felsstürze mit großem Zerstörungspotenzial und Reichweite relativ häufig auftreten, jedoch vorwiegend in abgelegenen Gebieten stattfinden. Sie haben somit meist nur geringe Auswirkungen auf Siedlungsgebiete.

Für die 12 ausgewählten Felssturzereignisse mit bekanntem Versagenszeitpunkt, ließen sich 75 % mit dem Indikator EWI in Verbindung bringen. Dieser Indikator repräsentiert den täglichen Flüssigwassereintrag, der durch flüssige Niederschläge, Schneeschmelze oder meist einer Mischung aus beidem entsteht. Aufgrund der geringen Anzahl zeitlich exakt eingrenzbarer Ereignisse war es nicht möglich, einen Schwellenwert für den EWI abzuleiten, weshalb wir uns auf Ein-Jahres-Ereignisse dieses Indikators konzentrierten. Interessanterweise zeigen die Klimaprojektionen für Ein-Jahres-EWI-Ereignisse kein eindeutiges Signal des Klimawandels, jedoch unterscheidet sich die Entwicklung in verschiedenen Höhenlagen. Dies deutet darauf hin, dass sich die Wahrscheinlichkeit für Ereignisse im Verlauf des 21. Jahrhunderts in unterschiedlichen Höhenlagen unterschiedlich verändern wird. Nur in den niedrigsten Höhenlagen, etwa um 1500 m, ist gegen Ende des 21. Jahrhunderts eine deutliche Reduktion erkennbar. Dies scheint durch die starke Verkürzung der Schmelzphase in dieser Höhenlage verursacht zu sein, die von derzeit 55 Tagen auf weniger als 30 Tage am Ende des Jahrhunderts unter dem Szenario SSP5-8.5 zurückgeht.

Aufgrund unserer kleinen Stichprobe von Felssturzereignissen können wir keine direkte Aussage über den Rückgang des Permafrosts auf einzelne Ereignisse treffen. Die Klimaszenarien weisen auf eine starke Erwärmung in allen Höhenlagen hin. Die schneefreie Periode wird sich von derzeit etwa 30 Tagen auf 2800 m auf 70 Tage im Niedrigemissionsszenario SSP1-2.6 und sogar auf 130 Tage im Hochemissionsszenario SSP5-8.5 verlängern. Das bedeutet, dass die Bedingungen am Ende des Jahrhunderts unter SSP1-2.6 auf 2800 m denen entsprechen werden, die derzeit auf 2500 m vorherrschen, und unter SSP5-8.5 denen auf 2000 m. Folglich wird die räumliche Verbreitung von Permafrost in jedem Szenario drastisch abnehmen.

Die Installation des In-situ-Felslabors am Stubaier Gletscher hat sich als großer Erfolg erwiesen und ermöglicht eine langfristige Erkundung und Beobachtung der Prozesse in steilen Felsflanken, die durch Gletscherrückzug und Permafrost beeinflusst sind. Die strategisch ideale Lage des Felslabors, kombiniert mit innovativer Instrumentierung und regelmäßigen Fernerkundungskampagnen, hat die Erhebung wertvoller Daten zu Steinschlag- und Felssturzprozessen ermöglicht. Multi-temporale Laserscanning Daten haben zudem eine zunehmende Felssturzaktivität im Laufe der Zeit gezeigt, insbesondere in den Sommermonaten, was mit erhöhten Temperaturen und schneefreien Bedingungen korreliert. Das größte aufgezeichnete zwei-phasige Felssturzereignis erreichte ein Gesamtvolumen von ca. 10.000 m<sup>3</sup> und demonstriert die fortschreitende Veränderung der Felsstabilität infolge von auftauendem Permafrost und Gletscherrückzug. Die Hangdeformationen einer sich langsam gleitenden Felsmasse waren schon in den Laserscandaten von 2006 und 2017 ersichtlich. Diese Ergebnisse unterstreichen die entscheidende Rolle des Labors bei der Weiterentwicklung von Methoden zur Gefahrenbewertung in hochalpinen Gebieten.

Das Projekt CAUTION lieferte neue Erkenntnisse zu den geologischen, felsmechanischen, meteorologischen und klimatischen Faktoren, die tiefgründige Felsgleitungen in alpinen Regionen beeinflussen. Die zentralen Ergebnisse zeigen, dass klimawandelbedingte Prozesse, insbesondere Gletscherrückgang und auftauender Permafrost, zur Destabilisierung von Felsflanken beitragen und die Entstehung von Felsgleitungen begünstigen oder Beschleunigungsphasen auslösen kann. Die numerischen Modelle verdeutlichen, dass der Gletscherrückgang nicht nur die stabilisierenden Kräfte im unteren Abschnitt der Gleitung reduziert, sondern auch die Bildung neuer Trennflächen und deren Vernetzung fördert, was schlussendlich die Bildung einer basalen Scherzone fördert. Für Felsgleitungen, die in niedrigeren Höhenlagen liegen, wie z.B. Steinlehnen, wurde Regen und Schneeschmelze als primäre Auslöser für Hangbeschleunigungen identifiziert, wobei Korrelationen zwischen Niederschlagsereignissen und Beschleunigungsphasen festgestellt wurden. Moderne Überwachungstechniken wie GBInSAR und TLS erwiesen sich als äußerst wertvoll, um Deformationsdaten kontinuierlich oder episodisch zu erfassen und mögliche Deformationsszenarien zu entwickeln. Unsere Ergebnisse unterstreichen zudem die Bedeutung der Integration geologischer Daten und langfristiger Verschiebungsmessungen mit fortschrittlichen numerischen Modellen, um das Zusammenspiel zwischen geologischen Ursachen und externen Auslösern auf die geomechanischen Prozesse besser zu verstehen. Unsere Erkenntnisse unterstreichen zudem die Notwendigkeit, Gefahrenbewertungen auf Multigefahrenprozesse auszurichten. Dazu zählt beispielsweise die Kombination von Hochwasserereignissen mit Hangfusserosion und/oder extremen Niederschlägen, die bestehende tiefgründige Felsgleitungen reaktivieren oder beschleunigen können. Während entlegene Felsgleitungen im Hochgebirge, die durch Permafrost und Gletscherrückgang beeinflusst werden, oft nur begrenzte direkte Gefahren für weitentfernte Wohngebiete und Infrastrukturen darstellen, kann ein Übergang zu

anderen Prozessen und Gefährdungen erfolgen, wie z.B. die Bildung von Rückstauseen oder die Veränderung der Sedimentdynamik. CAUTION erhöht das Prozessverständnis von Felsgleitungen unter sich verändernden klimatischen Bedingungen und bietet eine Grundlage für angepasste Strategien zur Gefahrenbeurteilung und Risikoreduktion.

Die Ergebnisse von CAUTION tragen auch wesentlich zum Verständnis der räumlichen und zeitlichen Entwicklung der Exposition durch Naturgefahren im Bundesland Tirol im Verlauf des letzten Jahrhunderts bei. Durch die Integration hochauflösender, GIS-kompatibler Datensätze – insbesondere des österreichischen Gebäude- und Wohnungsregisters (AGWR II) – in Kombination mit Gefahrenkarten, Infrastrukturdaten und sozio-demografischen Informationen war es möglich:

- die statische und dynamische Exposition durch verschiedene Gefahrenarten (Hangrutschungen, Wildbäche, Überschwemmungen und Lawinen) zu quantifizieren,
- die Exposition nach Gebäudekategorien (z. B. Wohngebäude, Gewerbegebäude, tourismusbezogene Gebäude) zu differenzieren,
- zeitliche Trends in der Exposition und der Siedlungsausdehnung, einschließlich der jährlichen Neubaurate in gefährdeten Gebieten, zu identifizieren,
- Expositionsschwerpunkte zu bewerten und diese mit zukünftigen sozioökonomischen Szenarien (z. B. SSP2) zu verknüpfen, um Einblicke in mögliche zukünftige Risikomuster und Anpassungsbedarfe zu gewinnen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Tirol zwar stark von alpinen Naturgefahren betroffen ist, die Höhe der Exposition im Sinne einer Gefährdung von Gebäuden im österreichischen Kontext jedoch moderat ist und im nationalen Mittelfeld liegt. Dies ist vor allem auf die Kombination aus einer gestreuten Siedlungsstruktur und einer geringeren Bevölkerungsdichte zurückzuführen, die die Intensität der Gefahren in vielen Gebieten ausgleichen. Die Ergebnisse verdeutlichen jedoch auch die fortgesetzte Expansion tourismusbezogener Infrastruktur (z. B. Hotels) in gefährdeten Gebieten, insbesondere in solchen, die anfällig für Hangrutschungen und Felsstürze sind. Dies erfordert eine engmaschige Überwachung und gezielte politische Maßnahmen (Fuchs et al. 2015).

Der transdisziplinäre Ansatz des Projekts ermöglichte es, komplexe reale Situationen zu adressieren und unterschiedliche Wissensformen zu integrieren. Gleichzeitig erforderte er Flexibilität in den Projektzielen und realistische Erwartungen an die erzielbaren Ergebnisse während und nach dem Projekt. In Stakeholder-Workshops wurde ein starkes Interesse an einem Multi-Risiko-Management geäußert, um die zukünftige Lebensqualität in alpinen Regionen sicherzustellen. Wichtige identifizierte Aspekte umfassen die Sensibilisierung auf allen Ebenen, einen verbesserten Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis, einen besseren

Zugang zu nutzbaren Daten für Gemeinden, eine verbesserte Gefahrenüberwachung und Frühwarnsysteme, eine stärkere Kapazität kleiner Gemeinden sowie eine optimierte vertikale Governance.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass Gemeinden die Zusammenhänge zwischen mehreren Gefahren, sich verändernder Exposition unter unsicheren Klimawandelbedingungen erkennen. Sie sind jedoch weiterhin unsicher in Bezug auf konkrete Handlungsoptionen. Die derzeitigen Governance-Strukturen sind noch nicht ausreichend, um die gegenwärtigen und zukünftigen Herausforderungen optimal zu bewältigen. Es bedarf daher eines umfassenden Multi-Risiko-Managements für Klima- und Naturgefahren, das Barrieren wie fragmentierte Governance, begrenzte Ressourcen, konkurrierende Landnutzungsinteressen und unzureichend nutzbare Daten auf lokaler Ebene überwindet. Die Untersuchung der Handlungsoptionen, die Gemeinden im Kontext von Naturgefahren und Klimawandel zur Verfügung stehen, zeigte, dass viele dieser Optionen lediglich auf Informationsbereitstellung basieren, freiwillig sind, keine Verantwortlichkeiten zuweisen und ohne finanzielle Ressourcen auskommen. Als Best-Practice-Beispiele wurden das KLAR!-Programm und der „Naturgefahren-Check“ für Gemeinden hervorgehoben.

## Referenzen

Aichinger, M., (2024). GIS-Analysis of the Terrain Change of Stubai Glacier Rock Laboratory in Respect of Rock-fall and Glacier Retreat. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien, 163 S.

Bajni, G., Camera, C. A., Apuani, T. (2021). Deciphering meteorological influencing factors for Alpine rockfalls: a case study in Aosta Valley. *Landslides*, 18(10), 3279-3298.

Fey, C., Wichmann, V., Zangerl, C. (2025). Influence of permafrost degradation and glacier re-treat on recent high mountain rockfall distribution in the eastern European Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 50(5), e70063. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/esp.70063>

Fuchs S, Keiler M, Zischg A (2015) A spatiotemporal multi-hazard exposure assessment based on property data. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 15 (9):2127-2142. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2127-2015>

Geomechanica Inc. (2024). IRAZU 2D TUTORIAL MANUAL. In (Version 6.2)

Gerstner, R. (2025). Unravelling the critical role of rock mass fracturing in metamorphic rock slope instabilities: field, laboratory, remote sensing, and numerical modelling approach, BOKU University, Dissertation Thesis, Vienna, April 2025

Gerstner, R., Maschler, A., Schneider-Muntau, B., Agliardi, F., Avian, M. Frießenbichler, M., Zangerl, C. (2025). The critical role of fracture propagation in the evolution of extensive, structurally preconditioned rockslides, *Engineering Geology*, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108359>.

Hartmeyer, I., Keuschnig, M., Pläsken, R., Rau, M., Delleske, R., Dörfler, M., Krautblatter, M., Burger, D. (2020). Der Einfluss von Gletscher-Randklüften auf Felsstürze. Abteilung 6 – Infrastruktur und Verkehr, Referat 6/02, Landesgeologischer Dienst. [www.salzburg.gv.at/randkluefte.pdf](http://www.salzburg.gv.at/randkluefte.pdf)

Hiebl, J., Frei, C. (2016). Daily temperature grids for Austria since 1961—concept, creation and applicability. *Theoretical and applied climatology*, 124(1), 161-178.

Hiebl, J., Frei, C. (2018). Daily precipitation grids for Austria since 1961—Development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling. *Theoretical and applied climatology*, 132(1), 327-345.

Itasca. (2018). UDEC—Universal distinct element code, Version 7.0, User's Manual. In (Version 7.0) Itasca Consulting Group.

Olefs, M., Koch, R., Schöner, W., Marke, T. (2020). Changes in snow depth, snow cover duration, and potential snowmaking conditions in Austria, 1961–2020—a model based approach. *Atmosphere*, 11(12), 1330.

O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.

Rechberger, C., Fey, C., Zangerl, C. (2021). Structural characterisation, internal deformation, and kinematics of an active deep-seated rock slide in a valley glacier retreat area. *Engineering Geology*, 286, 106048.

Rechberger, C., Zangerl, C. (2022). Rock mass characterisation and distinct element modelling of a deep-seated rock slide influenced by glacier retreat. *Engineering Geology*, 300, 106584.

Zangerl, C., Eberhardt, E., Schönlaub, H., Anegg, J. (2007). Deformation behavior of deep-seated rockslides in crystalline rock. In: *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands - Eberhardt, Stead & Morrison (eds)*, 2007 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44401-9, Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 27-31 May, 901-908.

## C) Projektdetails

### 1 Methodik

Die Methodik des Projekts CAUTION umfasste eine breite Palette von Ansätzen, von meteorologischen Analysen und Fernerkundung bis hin zu numerischer Modellierung und Stakeholder-Einbindung. Die Ergebnisse liefern wertvolle Einbli-

cke in die Auswirkungen des Klimawandels auf Sturz- und Gleitprozesse in hochalpinen Regionen und bieten eine Grundlage für zukünftige Forschung und Risikomanagementstrategien.

### Arbeitspaket WP1: Meteorologische und klimatologische Analysen und Zukunftsprognosen

WP1 beinhaltet die Analyse der Wetterbedingungen, die mit historischen Felssturzereignissen in Verbindung stehen. Die Methodik wurde dabei an die Verfügbarkeit von Felssturzereignissen angepasst. Insgesamt wurden 29 Ereignisse zwischen 1999 und 2024 mit genauen Zeitangaben identifiziert, von denen 12 Ereignisse mit einem Volumen von mehr als 40.000 m<sup>3</sup> für eine detaillierte Analyse ausgewählt wurden. Die meteorologische Analyse basierte auf dem SPARTACUS-Datensatz für tägliche Temperatur und Niederschlag (Hiebl & Frei, 2018, Hiebl & Frei, 2016) und SNOWGRID für Schneebedeckung (Olefs et al., 2020). Da viele Felsstürze während schneebedeckter Perioden auftraten, wurde neben dem Niederschlag auch die Wasserinfiltration durch Schneeschmelze berücksichtigt. Die Grundlage für die Analyse bildete die „effektive Wasserinfiltration“ (EWI, Bajni et al, 2021), die die tägliche Summe aus Schneeschmelze und flüssigem Niederschlag darstellt. Um Schneebedeckung und -schmelze in verschiedenen Höhenlagen zu schätzen, wurden SNOWGRID-Daten (1961–2024) und mittlere Lufttemperaturen aus ERA5-Reanalysen analysiert. Diese Methode wurde auf CMIP6-Klimaszenarien (O'Neill et al., 2016) angewendet, um Klimawandelsignale für relevante EWI-Werte abzuleiten.

### Arbeitspaket WP2: Ereignisinventar und Prozessanalysen der Auswirkungen des Klimawandels auf Sturz- und Gleitprozesse

WP2 fokussiert auf der systematischen Erfassung und Analyse von Sturzprozessen unterschiedlicher Größe sowie die Kompilation von Daten über ausgewählte tiefgründige Felsgleitungen. Zusätzlich wurden weitere Untersuchungen an diesen Felsgleitungen durchgeführt, um die Prozesse besser zu verstehen. Erkundungen und Analysen erfolgten einerseits auf regionaler andererseits auf lokaler Ebene. Dabei kam eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden, darunter Fernerkundung (Airborne und Terrestrial Laserscanning), in situ Monitoring (GNSS, Tachymetrie, GBInSAR), geologische und hydrogeologische Felduntersuchungen, GIS-Analysen und numerische Modellierung zur Anwendung. Auf regionaler Maßstabsebene wurden hochauflösende Airborne-Laserscanning-Daten (ALS 2006 und 2017) verglichen, um Steinschlag- und Felssturzprozesse in den Ötztaler und Stubai Alpen zu identifizieren. Über 1.989 Sturzereignisse wurden dokumentiert, darunter sieben Ereignisse mit einem Volumen von über 100.000 m<sup>3</sup>. Die 1.989 erfassten Sturzereignisse wurden hinsichtlich Prozesstyp, Volumen, Höhe, Exposition und Zusammenhang mit Permafrost und Gletscherrückzug untersucht. Für ausgewählte Großereignisse wurden meteorologische Faktoren wie Niederschlag, Temperatur und Frost-Tau-Zyklen und effektive Wasserinfiltration analysiert, um mögliche Auslösefaktoren zu identifizieren. Ausgewählte tiefgründige

Felsgleitungen, wie beispielsweise Steinlehnen und Rauhjoch, wurden im Hinblick auf den Einfluss klimawandelbedingter Faktoren untersucht. Dies umfasste geomorphologisch-geologische Kartierungen, Laserscanning- und UAV-Kampagnen, GBInSAR-Monitoring sowie hydrogeologische Untersuchungen. Für die Felsgleitung Rauhjoch wurde ein geologisches und numerisches Modell erstellt. Bestehende und neu erhobene Monitoring-Daten wurden analysiert, um die Auswirkungen von Klimawandelfaktoren auf Felsgleitungen zu bewerten. Dabei kamen auch numerische Modelle zum Einsatz, um die Einflüsse von auftauendem Permafrost und Gletscherrückgang zu untersuchen.

### Arbeitspaket WP3: Szenarien der Auswirkungen des Klimawandels auf Sturz- und Gleitprozesse

Arbeitspaket WP3 konzentriert auf den Aufbau eines In-situ Felslabors im Hochgebirge um systematisch neue Daten über Sturzprozesse zu gewinnen, die Durchführung von neuen Monitoring-Kampagnen sowohl am Felslabor also auch bei ausgewählten Felsgleitungen, und der Analyse und Prognose zukünftiger Prozesse. Am Felslabor am Stubaier Gletscher wurden 13 Temperatursensoren und vier Rissmeter installiert, sowie Fernerkundungskampagnen (TLS, UAV) und Gletscherrückgangskartierungen (1869–2021) durchgeführt. Eine Webcam wurde installiert, um die Sturzaktivitäten in Zukunft genau zeitlich einordnen zu können. Kontinuierliche Langzeitüberwachung mit einem GBInSAR-System erfolgte an der Felsgleitung Steinlehnen und UAV-Kampagnen wurden an ausgewählten Felssturzlokalitäten durchgeführt. Auf Grundlage der Sturzprozessdatenbank wurden statistische Analysen zu klimawandelbedingten Ereignissen durchgeführt, die als Grundlage für zukünftige Gefahrenbeurteilungen hinsichtlich Häufigkeiten, Volumen und Lokalität dienen. Geomechanische numerische Modellierungen von Felsgleitungen dienen einerseits dazu das Prozessverständnis zu erhöhen und andererseits den Einfluss von Klimawandelbedingten Faktoren zu erfassen. Für die Fallstudie Steinlehnen und Rauhjoch wurden neue Modelle entwickelt, um die Auswirkungen von Grundwasser und Gletscherrückzug auf die Hangstabilität zu bewerten.

### Arbeitspaket WP4: Raum-zeitliche Expositionsdynamik auf lokaler und regionaler

Arbeitspaket WP4 konzentriert sich auf die Analyse der Exposition von Gebäuden und Bevölkerung gegenüber Naturgefahren. Eine detaillierte Bestandsaufnahme von Gebäuden und Bevölkerung wurde durchgeführt. Die wichtigsten Datenquellen waren das Bundesgebäuderegister (AGWR II) und GIS-kompatible Datensätze. GIS-Tools und R-Software wurden verwendet, um Gebäude zu identifizieren, die verschiedenen Gefährdungstypen ausgesetzt sind. Datenquellen wie das Digitale Landschaftsmodell (DLM) und OpenStreetMap (OSM) wurden integriert.



Fey, C., Wichmann, V., & Zangerl, C. (2025). Influence of permafrost degradation and glacier re-treat on recent high mountain rockfall distribution in the eastern European Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 50(5), e70063.

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/esp.70063>

Fey, C. 2025: Brechen die Berge durch den Klimawandel auseinander? Zeitschrift Bergundsteigen, 06/2025. <https://www.bergundsteigen.com/artikel/brechen-die-berge-durch-den-klimawandel-auseinander/>

Gerstner, R. (2025). Unravelling the critical role of rock mass fracturing in metamorphic rock slope instabilities: field, laboratory, remote sensing, and numerical modelling approach, BOKU University, Dissertation Thesis, Vienna, April 2025

Gerstner, R., Maschler, A., Schneider-Muntau, B., Agliardi, F., Avian, M. Frießenbichler, M., Zangerl, C. (2025). The critical role of fracture propagation in the evolution of extensive, structurally preconditioned rockslides, *Engineering Geology*, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108359>.

Gerstner, R., Maschler, A., Schneider-Muntau, B., Agliardi, F., Avian, M. Frießenbichler, M., Zangerl, C. (2025). The critical role of fracture propagation in the evolution of extensive, structurally preconditioned rockslides, *Engineering Geology*, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108359>.

Pfluger, F., Weber, S., Steinhauser, J., Zangerl, C., Fey, C., Fürst, J., Krautblatter, M. (2025). Massive permafrost rock slide under a warming polythermal glacier deciphered through mechanical modeling (Bliggspitze, Austria). *Earth Surface Dynamics*, 13(1), 41-70. <https://esurf.copernicus.org/articles/13/41/2025/esurf-13-41-2025.pdf>

Zangerl, C., Fey, C. Prager, C., Schneider-Muntau, B. 2025. Bröselzone Alpen, Zeitschrift Blaulicht, 07/08 2025, <https://www.blaulicht.at/>

#### Factsheets für die Gemeinde Gries im Sellraintal und Gemeinde Kaunerberg

- Rieder, H., Formayer, H., Lehner, F., Amaichigh, M. (2025). Factsheet Klimaanalyse
- Zangerl, C., Kuschel, E., Fey, C. (2025). Factsheet Rutschung Steinlehen und Factsheet Rutschung Wiesenhof-Stupfarri
- Fuchs, S., Echtler, P. (2025) Factsheet Expositionsentwicklung
- Keiler, M., Polderman, A. Kehl, A. (2025) Factsheet Handlungsoptionen und Anpassungsmöglichkeiten