

Kurzstudie «Naturgefahren – Ausbau Kraftwerk Kaunertal»

Prof. em. Dr. Wilfried Haerberli

Geographisches Institut, Universität Zürich

Klimabedingt verändert sich das Hochgebirge schnell und langfristig irreversibel. Bei der Planung von Kraftwerksprojekten für kommende Jahrzehnte müssen deshalb Naturgefahren jenseits historischer Erfahrung in Betracht gezogen werden. Im Kaunertal betrifft dies in erster Linie das Verschwinden der Gletscher, die Bildung neuer Seen, die abnehmende Stabilität von Felsflanken im Permafrost und die Möglichkeit von gefährlichen Prozessketten in vernetzten Systemen. Wissen, Daten und Techniken für prospektive Abklärungen sind vorhanden und müssen genutzt werden.

Präambel

Die vorliegende Kurzstudie wurde im Auftrag des WWF Österreich verfasst. Im Zusammenhang mit dem geplanten Pumpspeicherbetrieb im Kaunertal und Platzertal umfasst sie in konzentrierter Form und auf dem gegenwärtigen Stand des Wissens klimarelevante Fragen hinsichtlich Landschaftsveränderung und Naturgefahren. Diese Fragen müssen bei Kraftwerksprojekten im Hochgebirge prioritär untersucht werden.

1. Grundsätzliches und Struktur des Berichts

Der Bedarf der Gesellschaft nach Energie, Wasser und Erholung in den Bergen steigert den Druck auf das Hochgebirge. Multiple Interessen müssen abgewogen werden. Sie betreffen Räume und Systeme, die sich als Folge des globalen Klimawandels schnell und auf lange Zeit irreversibel verändern. Es entstehen Ungleichgewichte weit jenseits historischer und holozäner Bedingungen. Besonders betroffen sind mit Schnee und Eis verbundene Phänomene und Prozesse. Der Gletscherschwund ist für alle sichtbar und in der öffentlichen Wahrnehmung präsent. Die Degradation des Permafrostes im Berginnern dagegen entzieht sich der visuellen Beobachtung. Die damit verbundenen Vorgänge und Gefahren sind deshalb weit weniger bekannt und werden oft unterschätzt oder gar ignoriert. Sicherheit muss jedoch vorgehen (vgl. <https://naturwissenschaften.ch/id/KA8AT?embed=aj2Qh>). Im Folgenden wird daher der aktuelle Wissensstand im Hinblick auf den geplanten Ausbau der Kraftwerke Kaunertal erörtert.

Das Einzugsgebiet des geplanten Pumpspeicherwerks Kaunertal/Platzertal ist ausgesprochen klimasensitiv mit noch verbleibenden Gletschern und verbreitetem Permafrost (Bild 1). Im dicht bevölkerten Alpenraum sind Interesse und Wissensstand zu dieser Thematik ausgesprochen relevant. Dieser Wissensstand (Februar 2025) zu klimabedingter Landschaftsentwicklung und sich verändernden Naturgefahren wird zuerst zusammengefasst. Im Fokus sind Schlüsselerkenntnisse und neueste Literatur, in der reiche Hinweise auf

weitere Arbeiten zu finden sind. Darauf aufbauend wird die lokale Situation im Kaunertal/Platzertal im Sinne einer Vorstudie übersichtsmässig analysiert. Der betrachtete Höhenbereich oberhalb von 2000 m ü.M. entspricht weitgehend dem waldfreien «Hochgebirge». Er liegt etwas höher als der Gepatsch-Speicher und umfasst den geplanten Speicher im Platzertal. Der betrachtete Zeithorizont bis Ende Jahrhundert entspricht den im Kraftwerksbetrieb üblichen Konzessionsdauern von Jahrzehnten.

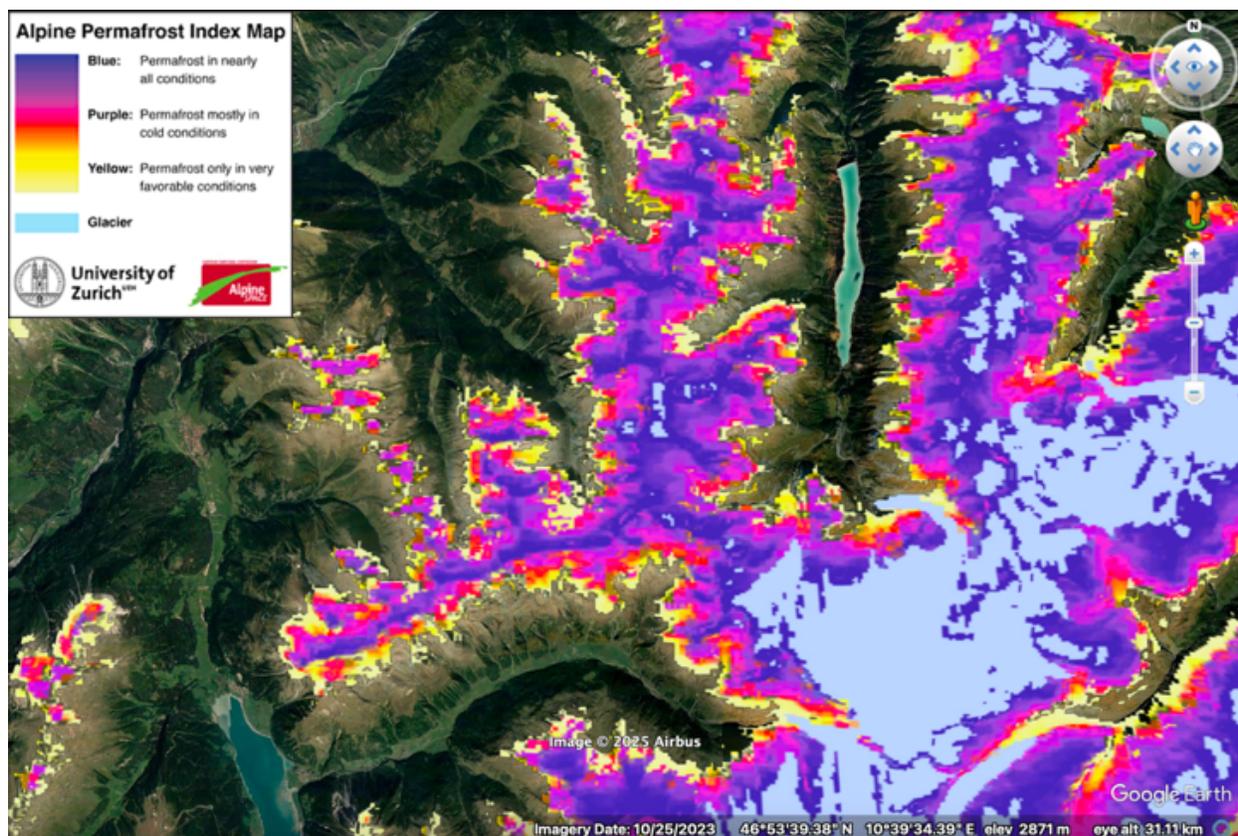


Bild 1: Kaunertal und Platzertal mit Permafrost nach dem Alpine Permafrost Index Map (APIM; Boeckli et al. 2012).

2. Klimabedingte Landschaftsveränderung im Hochgebirge

Die schnellen und irreversiblen Veränderungen im Hochgebirge wirken sich grossräumig aus. Mit dem Gletscherschwund nimmt der Wasserabfluss für das Tiefland im Hochsommer ab. Erosion auf von Gletschern freigelegten Moränenhalden und neu sich bildende Seen beeinflussen den Geschiebehalt ganzer Flusssysteme. Fels-/Eisstürze von erwärmten und geschwächten Permafrost-Flanken können in solchen Seen weitreichende Flutwellen auslösen. Das entsprechende Risiko steigt systematisch an (Haeberli et al. 2017). Die jüngsten Ereignisse von Chamoli und South Lhonak im indischen Himalaya zerstörten weit talabwärts Kraftwerksanlagen (Shugar et al. 2021, Sattar et al. 2025). Bestehende wie geplante Infrastruktur muss hinsichtlich solch potenziell gefährlicher Entwicklungen in ihrem Einzugsgebiet überprüft werden. Dazu braucht es eine integrative und zukunftsorientierte Betrachtung der vernetzten und interagierenden Teilsysteme.

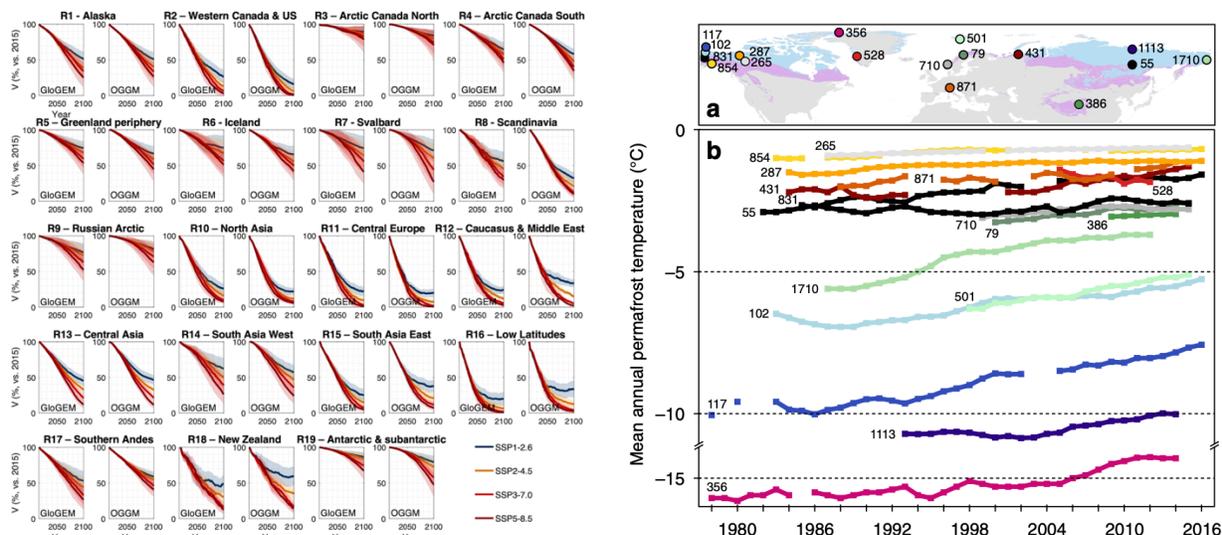


Bild 2: Weltweiter Gletscherschwund bis Ende des 21. Jahrhunderts (links) nach neuesten Modellvergleichen für verschiedene Klimaszenarien (Zekollari et al. 2024). Permafrost-Bohrlochtemperaturen (rechts) der Nordhemisphäre (Biskaborn et al. 2019).

2.1 Gletscher

Der Gletscherschwund als Folge der steigenden Lufttemperaturen ist ein globales Phänomen. Langfristige Beobachtungen und zunehmend hochauflösende Satellitenbilder dokumentieren rasante Verluste. Diese primär durch den globalen Temperaturanstieg verursachten Verluste lösen sich selbst verstärkende Effekte aus (positive Rückkopplung): Aufheizung durch freigelegte Felspartien, abnehmende Rückstrahlung (Albedo) durch kleiner werdende helle Firngebiete (Hartl et al. 2025), absinkende Gletscheroberflächen. Weitere massive Verluste sind daher bereits vorgegeben. Numerische Modelle können heute die dokumentierte Entwicklung wie auch ihre zukünftige Fortsetzung realistisch simulieren (Bild 2, links). Selbst bei optimistischen Annahmen zu politischen Klimaentscheidungen wird am Ende des 21. Jahrhunderts in Gebirgen mit eher kleinen Gletschern wie in den Alpen nur ein kleiner Prozentsatz (< 20%) des heute noch vorhandenen Gletschereises übrigbleiben.

2.2 Neue Seen

Als einziges Element der Natur können Gletscher tief unter die Oberfläche einschneiden und übertiefte Becken mit markanten Gegensteigungen formen. Werden solch übertiefte Becken durch den Gletscherrückgang freigelegt, entstehen neue Seen. Dieser Prozess ist derzeit mit grosser Geschwindigkeit im Gang und kann mit Satellitenbildern exakt dokumentiert werden. Weltweit hat sich schon nur in der Zeitspanne 1990 – 2018 das Volumen von solchen Gletscherseen nahezu verdoppelt (Bild 3; Shugar et al. 2020). Interdisziplinäre Forschung wie auch politische Diskussionen zu diesem klimagesteuerten Phänomen mit seinen komplexen Aspekten von Gefahren, Potenzialen und multiplen Interessen sind intensiv (Haeberli and Drenkhan 2022), speziell hinsichtlich der mit plötzlichen Seeausbrüchen verbundenen Risiken (Zheng et al. 2021, Zhang et al. 2024). Verschiedene Modellansätze können für die Vorhersage verwendet werden, wo und etwa wann weitere Gletscherseen entstehen könnten (z.B. Magnin et al. 2020, Furian et al. 2022).

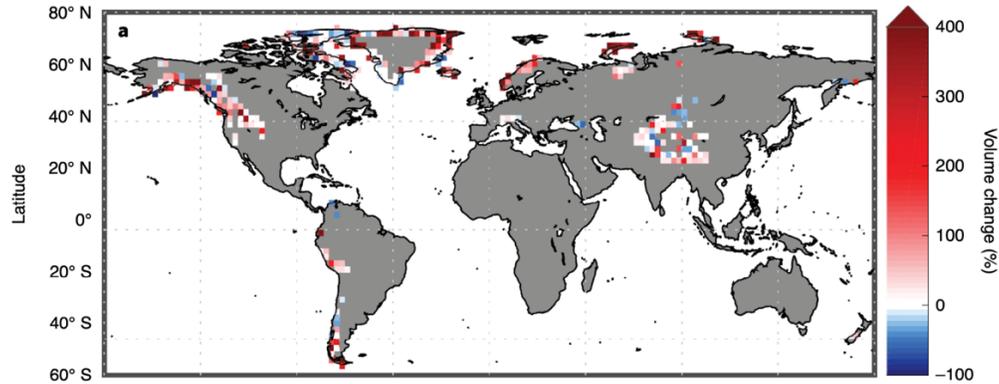


Bild 3: Weltweite Volumenänderung von Gletscherseen zwischen 1990-1995 und 2015-2018 aufgrund des Gletscherschwundes mit wachsenden und sich neu bildenden Gletscherseen (Shugar et al. 2020).

2.3 Permafrost

Untergrundmaterial mit ganzjährigen Temperaturen unter 0°C wird als Permafrost bezeichnet. Im Hochgebirge betrifft dies neben steilen Felspartien im Gipfelbereich auch Lockerschuttmassen wie Moränen und Schutthalden. Als Temperaturphänomen ist Permafrost direkt klimagesteuert. Unter Gleichgewichtsbedingungen nimmt im Hochgebirge mit topographisch reduziertem geothermischem Wärmefluss die Temperatur mit der Tiefe um etwa 1°C auf 30 bis 50 m Tiefe zu. Die dauernd gefrorenen Zone kann mehr als 100 Meter in die Tiefe reichen, die Pyramide des Matternhorns beispielsweise ist gänzlich durchgefroren (Noetzli and Gruber 2009). Durch den globalen Temperaturanstieg seit dem 19. Jahrhundert hat die Temperatur im Berginneren generell und somit auch im Permafrost zugenommen (Bild 2 rechts). Die von der Oberfläche ausgehende Erwärmung erfasst über den langsamen Prozess der Wärmediffusion immer grössere Tiefen. In Borlöchern, wie sie durch das EU-PACE Projekt für Langfrist-Beobachtung in einem europäischen N-S Transekt angelegt wurden (Bild 4 rechts), erkennt man, dass die entsprechende Temperaturanomalie bereits tief ins Berginnere vorgedrungen ist. In rund 100 m unter der Oberfläche entsprechen die heutigen Permafrost-Temperaturen noch weitgehend den kälteren Bedingungen während der «Kleinen Eiszeit». In 10 m Tiefe steigen die Temperaturen im europäischen Fels-Permafrost gegenwärtig um rund 0.5°C pro Jahrzehnt an (Noetzli et al. 2024).

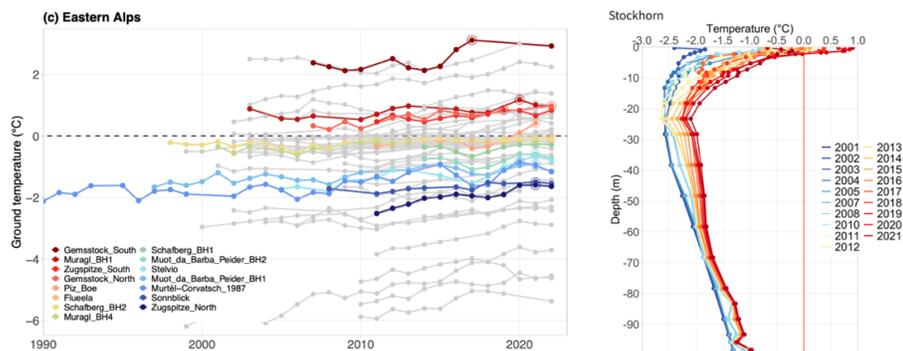


Bild 4: Bohrlochtemperaturen im Alpen Permafrost: Entwicklung in 10 m Tiefe (links; Noetzli et al. 2024) für die Ostalpen (Farbe) im Vergleich zu entsprechenden Zeitreihen in den ganzen Alpen und in Svalbard (hellgrau). Entwicklung der Permafrost-Temperatur mit der Tiefe (rechts; Hoelzle et al. 2022) für die Bohrung Stockhorn (3530 m ü.M.) bei Zermatt.

Lang andauernde Gefrierprozesse verändern die geotechnischen Eigenschaften von Lockergesteinen fundamental. Eislinsenbildung in frostgefährlichen Feinmaterialien wie Silt und Feinsand verbindet einzelne Gesteinskomponenten miteinander und baut dadurch im an sich kohäsionslosen Schutt starke Kohäsion auf. Sie trennt aber auch Gesteinskomponenten voneinander und reduziert dadurch die innere Reibung von Schutthalden und Moränen. Das führt zu langfristiger, kumulativer Deformation durch viskoses Fließen («steady state creep» oder «secondary creep»). Typische Oberflächengeschwindigkeiten sind Dezimeter pro Jahr. Über Jahrtausende entstehen so auffällige Landschaftsformen, die aus historischen Gründen «Blockgletscher» (rock glaciers) genannt werden. Der Anstieg der Permafrost Temperaturen hat in den letzten Jahrzehnten zu einer Beschleunigung dieses langfristigen Kriechprozesses geführt (Kellerer-Pirklbauer et al. 2024, Hu et al. 2025).

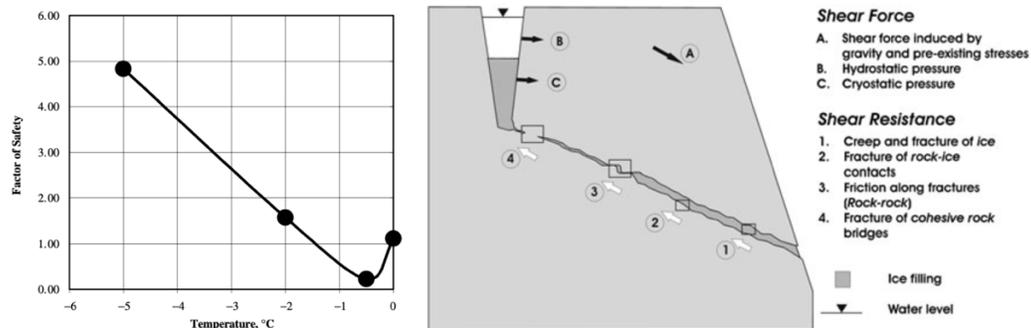


Bild 5: Temperaturabhängigkeit der Stabilität gefrorener Gesteinsmassen mit eisgefüllten Klüften (links; Zentrifugen-Experimente, Davies et al. 2001) und Kräftekomponenten der Stabilität gefrorener Gesteinsmassen (rechts; Krautblatter et al. 2013).

Permafrost mit meist eisgefüllten Klüften, Poren und Rissen erhöht die Stabilität von Felsflanken. Der experimentell erwiesene Zusammenhang zwischen negativer Temperatur und Stabilität (Bild 5 links; Davies et al. 2001) betrifft sowohl das Eis wie auch Gesteinskomponenten und die Kontakte Eis-Gestein und Gestein-Gestein (Bild 5 rechts; Krautblatter et al. 2013). Die seit Jahrtausenden durch Frost erhöhte Stabilität kalter Berge dürfte mit ein Grund dafür sein, dass die mittleren Hangneigungen in der entsprechenden Höhenlage besonders hoch sind (Kühni und Pfiffner 2001). Dieser langfristige, durch Frost verstärkte Stabilitätseffekt wird gegenwärtig und zukünftig fortschreitend geschwächt.

Auftauprozesse im Permafrost sind nicht zuletzt wegen der bremsenden Effekte der latenten Energie beim Schmelzen von Eis ausgesprochen langsam. Für die oberflächennahe Auftauschicht werden charakteristische Wachstumsraten von Zentimetern pro Jahr beobachtet (PERMOS 2024), an der Permafrost Basis im tiefen Beginnern sind Auftauprozesse vielerorts noch gar nicht angekommen.

2.4 Gesamtsysteme

In den kommenden Jahrzehnten des 21. Jahrhunderts werden Gletscher in Gebirgsregionen wie den Alpen rasch und weitgehend vollständig verschwinden. Das dadurch freigegebene Gelände wird vielerorts nur sehr langsam, lückenhaft und in höheren Lagen wohl gar nicht wiederbewaldet (Bild 6). Der Permafrost in den Fels- und Schuttflanken wird weiter existieren, wenn die Gletscher schon längst verschwunden sind, allerdings in massivem thermischen Ungleichgewicht. Die dadurch verursachten Stabilitätsprobleme in den Hochgebirgen der Erde (Deline et al. 2021) sind eine schwerwiegende Klimafolge und werden langfristig weiter zunehmen.



Bild 6: Gletscherschwund und Wiederbewaldung am Morteratschgletscher (Schweizer Alpen): Die Wiederbewaldung der seit dem 19. Jahrhundert gletscherfrei gewordenen Fläche ist langsam und lückenhaft.

3. Klimabedingte Veränderung von Naturgefahren im Hochgebirge

Die globale Energiezunahme im Klimasystem bewirkt im Hochgebirge laufende Veränderungen der Gefahrensituation, die jenseits historischer Präzedenz und Erfahrung beurteilt werden müssen. Dies hat bereits in der Planungsphase anhand von zukunftsorientierten, mit Klimaszenarien gesteuerten Modellrechnungen zu erfolgen und ist während der Betriebsphase durch laufende Beobachtungen und Neubeurteilungen zu ergänzen. Im Vordergrund stehen Gletscher, neue Seen, Permafrost und vermehrte grosskalibrige Sturzereignisse.

3.1 Gletscherschwund, Eislawinen und ausbruchsgefährdete Seen

Eislawinen gehen meist von Hängegletschern in Steiflanken mit Neigung $>45^\circ$ und von zerrissenen Gletscherzungen in Felspartien mit Neigung $>25^\circ$ ab. Ihre horizontale Reichweite ist beschränkt (ca. 3 mal die Fallhöhe) und deshalb primär für Bergsteiger:innen in Eigenverantwortung oder für hochalpine Infrastruktur und entsprechende Nutzung (z.B. Zugangswege, Skipisten) relevant. Das grösste und am weitesten reichende Gefahrenpotenzial geht von Gletscherseen aus. Ausbrüche solcher Gletscherseen durch Breschenbildung in Moränendämmen oder durch quasi-instantane Freisetzung grosser Wassermassen infolge von Fels-Eisstürzen können über grosse Distanzen Schäden anrichten. Das jüngste Ereignis im Sikkim Himalaya (Sattar et al. 2025) dokumentiert den gravierenden Charakter solcher Ereignisse gerade auch für den Wasserbau im Hochgebirge.

3.2 Permafrost-Degradation und Felsstürze

Die Zunahme von grossen Fels- und Fels/Eisstürzen als Folge der abnehmenden Stabilität gefrorener Felsflanken in den Hochgebirgen der Erde ist ein gravierendes aber noch oft missverstandenes und unterschätztes

klimagesteuertes Phänomen. Die Reduktion der Stabilität ist – im Gegensatz zur oft gehörten Ansicht – nicht primär eine Folge des langsamen Auftauens von Eis im Fels, das «die Berge zusammenhält», sondern ein komplexes Zusammenspiel zwischen temperaturabhängigen Festigkeiten, Reibungen und hydraulischer Durchlässigkeit. Die besondere Schwäche von «warmem» Permafrost nahe 0°C (Bild 5 links) hängt mit dem vermehrten Gehalt an (ungefrorenem) Wasser zusammen. Dabei können in der Natur komplexe thermohydraulische Bedingungen entstehen (Offer et al. 2025, Haerberli et al. 2004). In Anrisszonen von Fels-/Eisstürzen ist mehrfach direkt anschliessend an das Ereignis unter Druck ausfliessendes Wasser beobachtet worden (vgl. Pierhöfer et al. 2024 zum grossen Sturzereignis 2024 am Piz Scerscen). Dies zeigt an, dass sich vor dem Sturz durch Permafrost gestaute Wasservorkommen mit hohen Wasserdrücken aufgebaut hatten.

Zeitpunkt, Ort und Volumen grosser Felsstürze können längerfristig (Jahre, Jahrzehnte) nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden. Zur Eintretenswahrscheinlichkeit solcher Ereignisse existieren hingegen grobe Richtwerte (Haerberli et al. 2022). Im gut dokumentierten zentralen Alpenraum sind im Höhenbereich > 2000 m ü.M. zwischen 1900 und 1980 vier Stürze mit Volumen von mehr als 1 Million m³ bekannt (Fischer et al. 2012). Dies entspricht einer mittleren Wiederkehrdauer von 20 Jahren oder auf eine «anfällige» Fläche (susceptible area) von 2500 km² mit Hangneigungen > 30 - 40° bezogen rund 50'000 Jahre pro km². Zwischen 1980 und 2007 sind weitere 7 Fälle dazugekommen. Die Wiederkehrdauer hat sich dadurch um den Faktor 5 auf 4 Jahre, und bezogen auf die gleiche anfällige Fläche auf rund 10'000 Jahre pro km² verkürzt. Die jüngsten Ereignisse (Cengalo 2011, 2017, Fluchthorn 2023, Scerscen 2024: 4 Fälle in 14 Jahren = 3.5 Jahre mittlere Wiederkehrdauer) bestätigen diese Tendenz. Die starke Zunahme seit dem letzten Teil des 20. Jahrhunderts könnte womöglich damit zusammenhängen, dass die Erwärmung der Atmosphäre wie des Permafrost im Hochgebirge den natürlichen Schwankungsbereich des Holozäns etwa um diese Zeit verlassen haben dürfte.

Mehr als das Volumen der stürzenden Masse beeinflusst die Dynamik von grossen Sturzereignissen das Gefahrenpotenzial. Grosse Unsicherheiten der Abschätzung werden durch die mögliche Aufnahme von Schnee/Eis/Wasser und Sedimenten entlang der Sturzbahn verursacht, die mit Modellrechnungen nur beschränkt realistisch wiedergegeben werden können (Walter et al. 2019, Shugar et al. 2021). Besonders grosse Reichweiten und Schäden werden durch Stürze in Seen verursacht, die weitreichende Flutwellen mit oft starker Sedimentaufnahme und Murgang-Charakter auslösen (Mani et al. 2024, Sattar et al. 2025).

4. Spezifische Situation im Kاونertal und Platzertal

Der rasante Gletscherschwund und die grossen Massenbewegungen im Permafrost an der Weissseespitze und an der Bliggspitze (2007; Pfluger et al. 2025) mit jeweils mehreren Millionen m³ Volumen zeigen eindrücklich, dass die klimagesteuerte Entwicklung in den kommenden Jahrzehnten im Einzugsgebiet der bestehenden und geplanten Speicher des Kاونertals/Platzertals sorgfältig analysiert werden muss. Die folgenden Ausführungen können als eine Art Projektskizze für eingehende Untersuchungen und Beobachtungen verstanden werden, mit denen Sicherheitsrisiken im Einzugsgebiet des geplanten Pumpspeicherwerks Kاونertal/Platzertal antizipiert und minimiert werden können.

4.1 Verschwindende Gletscher

In Anbetracht der gegenwärtigen welt- und klimapolitischen Situation kann für die kommenden Jahrzehnte nicht von einem optimistischen Klimaszenario – auf 1.5 oder 2°C limitierte globale Temperaturzunahme – ausgegangen werden. Bereits bis zur Jahrhundertmitte dürften im Gebiet des Gepatschferners die Volumenverluste gegenüber heute (2025) deutlich über 50% liegen (Bild 5; Hartl et al. 2024). Nach der Jahrhundertmitte werden für wenige Jahrzehnte noch isolierte Eisflecken verbleiben. Die Konsequenzen dieses Vorgangs für den Wasser- und

Geschiebehalt der Täler müssen in Betracht gezogen werden. Dies vor allem auch im Hinblick auf tendenziell intensivierte Extremniederschläge und den durch verschwundene Firngebiete reduzierten Rückhalteeffekt. Mit einem GIS-basierten Ansatz für die Sedimentbilanz von Gletschern (Zemp et al. 2005) kann abgeschätzt werden, ob das schwindende Eis Fels oder Schutt freilegt.

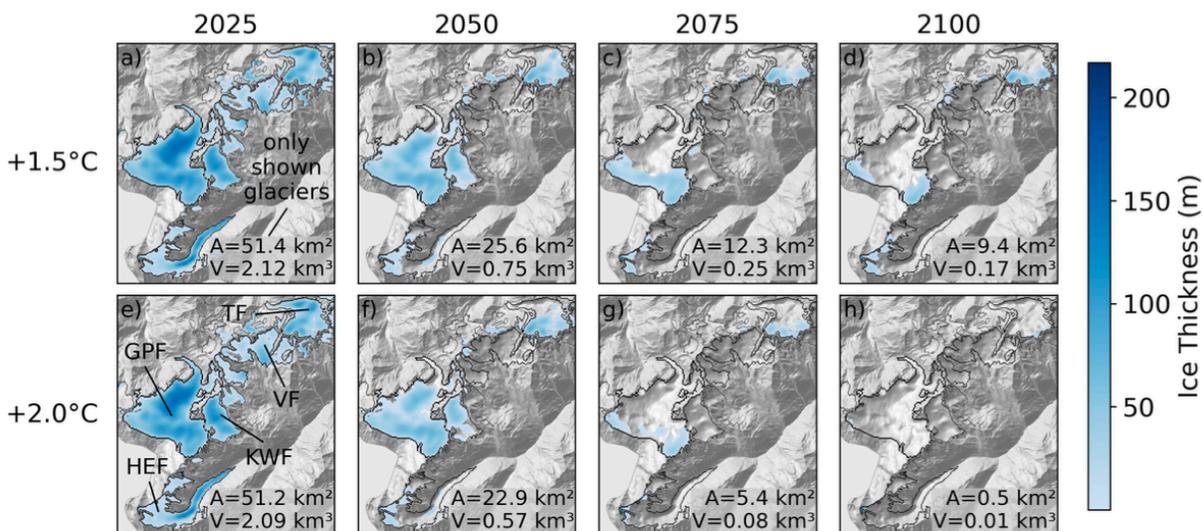


Bild 7: Schwundsszenarien für das Gebiet des Gepatschferners (Hartl et al. 2024).

4.2 Neue Seen

Im Bett von heute noch verbleibenden Gletschern existieren kleinere und grössere übertiefte Becken, die im Lauf der kommenden Jahrzehnte durch den Gletscherschwund freigelegt werden und in denen sich Seen bilden dürften (Bild 8). Die Unsicherheiten der entsprechenden Modellrechnungen sind allerdings gerade bei kleinen Gletschern und kleinen Formen beträchtlich (Otto et al. 2021). Die zwei grössten und von verschiedenen Modellansätzen einigermaßen übereinstimmend definierten neuen Seen dürften sich im flachen oberen Teil des Gepatschferners um die Jahrhundertmitte (unterer See) und danach (oberer See) bilden. Da im obersten Teil dieses Gletschers schuttliefernde Felswände fehlen, dürften diese neuen Seen mehrheitlich in einer Felslandschaft eingebettet sein. Im Bereich der Gletscherzunge mit ihrem gestuften Verlauf von Spaltenzonen in Steilstufen mit beschleunigtem Fliessen und flachen, spaltenfreien Zonen mit kompressivem Fliessen gegen einen Riegel im Gletscherbett könnte schon gegen die Jahrhundertmitte ein etwas kleinerer See entstehen (Hinweisfeil in Bild 8), der – wie teilweise auch der untere der beiden grossen Seen – von Sturzereignissen aus den angrenzenden, druckentlasteten Permafrost-Felsflanken (vgl. Krautblatter and Leith 2015) erreicht werden könnte. Eine allfällige Flutwelle aus einem dieser Seen würde innerhalb kurzer Zeit (rund eine halbe Stunde) den Gepatsch-Speicher erreichen und müsste dort zum Schutz der Unterlieger mit einer genügenden Retentionskapazität aufgefangen werden. Eine auf Modellrechnungen (z.B. Sattar et al. 2023) basierte Strategie für Frühwarnung und Hochwasserrückhalt muss rechtzeitig – am besten unverzüglich – vorbereitet werden. Die Entwicklung am Gletscher muss in den kommenden Jahrzehnten regelmässig beobachtet und laufend neu beurteilt werden. Bereits gegen die Mitte des Jahrhunderts könnte eine entsprechende Anpassung der Betriebsweise der bestehenden Anlagen notwendig werden.

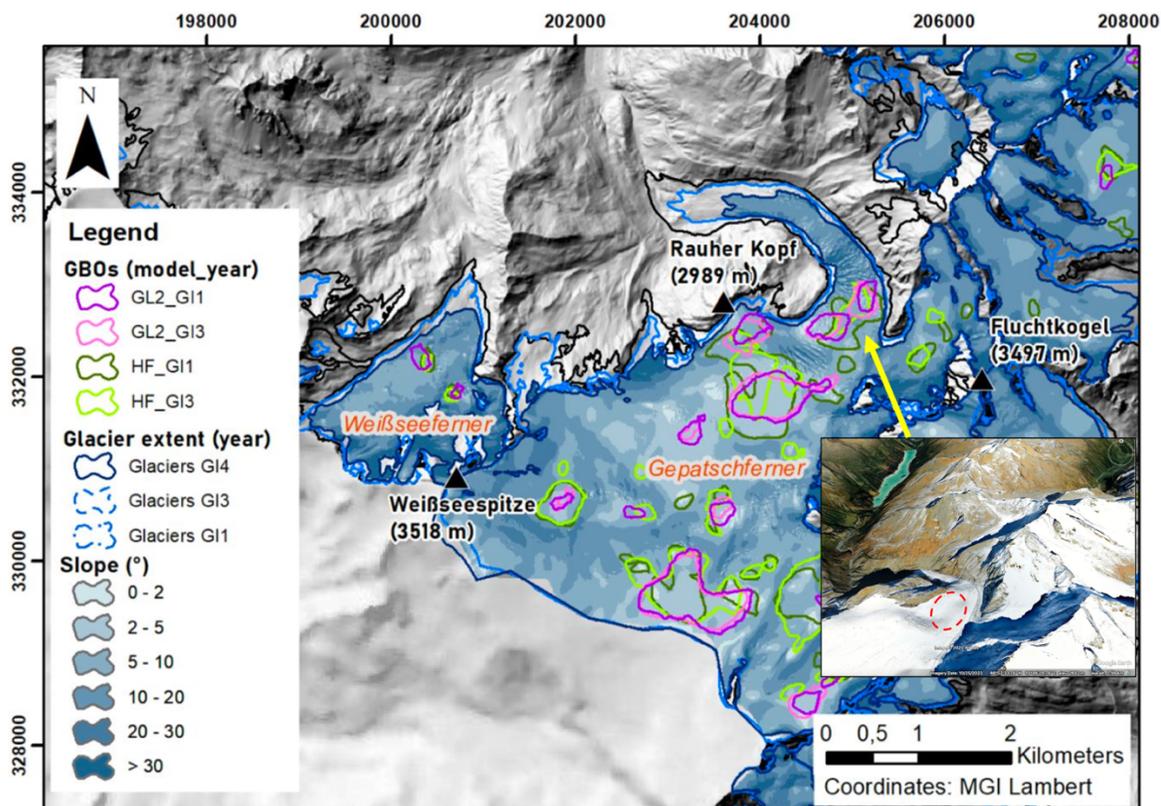


Bild 8: Modellerte Gletscherbett-Übertiefungen als potenzielle neue Seen (Otto et al. 2021). Einsatzbild mit gelbem Hinweispeil: Mögliche Seebildung (rot markiert) am Fuss steiler, druckentlasteter Permafrost-Steilflanken.

4.3 Permafrost in langfristigem Ungleichgewicht

Permafrost im Einzugsgebiet Kaunertal/Platzertal nimmt eine viel grössere Fläche ein als die noch existierenden Gletscher (Bild 1). Zeugen sind die zahlreichen, langfristigen Kriechphänomene (Blockgletscher) in dauernd gefrorenen Schutthalden und Moränen. Verbreitung und Kinematik dieser Permafrost-Indikatoren werden im Rahmen der globalen Klimabeobachtung inventarisiert und mit modernen Techniken in ihrer Entwicklung beobachtet (RGIK 2023; für Österreich siehe Wagner et al. 2020 und Fleischer et al. 2022 spezifisch für den Ölgruben Blockgletscher). Das in ihnen enthaltene Eis – örtlich variabel aber im Schnitt bei etwa 60 bis 80 Volumenprozent – ist Jahrtausende alt (Krainer et al. 2015), gerät aber immer mehr in einen Temperaturbereich nahe 0°C. Jährliche Fliessgeschwindigkeiten sind meist im Bereich von Dezimetern, haben aber vielerorts infolge des erwärmten Permafrostes stark zugenommen. Instabilitäten können in steilen Zonen und bei jährlichen Geschwindigkeiten > 10 m entstehen (Hartl et al. 2023). Blockgletscherfronten in steilem Gelände können Murgang-Anrisszonen sein (Kofler et al. 2021). Anhand des bestehenden Inventars (Wagner et al. 2020) sollten Fronten von Blockgletschern in steilem Gelände systematisch hinsichtlich der Murgang-Gefahr für bestehende wie geplante Anlagen analysiert werden.

4.4 Thermisch geschwächte Stabilität gefrorener Bergflanken

Das Phänomen der bereits tief ins Berginnere wirksam gewordenen und sich weiter verstärkenden Permafrostdegradation (Temperaturzunahme, beginnendes Auftauen, erhöhte Wasserzutritte ins Berginnere)

betrifft im Kaunertal/Platzertal primär steile Schattenflanken oberhalb von rund 2400 m mit Neigungen $> 30^\circ$. Über die Wasserzufuhr ins Berginnere kann dieser Vorgang der thermisch induzierten Stabilitätsreduktion allerdings auch wärmere, sonnenexponierte Teile steiler Berggipfel beeinflussen (vgl. Thurwieserspitz 2004, Sosio et al. 2008). Als Folge dieser Entwicklung und der dokumentierten Zunahme von grosskalibrigen Fels/Eisstürzen muss man davon ausgehen, dass die jährliche Eintretenswahrscheinlichkeit von Sturzereignissen mit Volumen von 1 Million m^3 und mehr über Zeiträume von Jahrzehnten und über grössere anfällige Flächen im Prozentbereich liegt. Es geht demnach um Jahrzehnte-Ereignisse.

Eine Objekt-orientierte, GIS-basierte Analyse kann eine Übersicht allfälliger Gefahrenpotenziale vermitteln. Dabei werden potenzielle Anrisszonen – Steiflanken im Permafrost (Cathala et al. 2024) und/oder vom Gletscherschwund druckentlastet – kombiniert mit mittleren Neigungen möglicher Fliesstrajektorien zu betrachteter Infrastruktur (hier v.a. die Speicher Gepatsch und Platzertal und neue Seen am Gepatschferner). Extreme untere Grenzwerte für gefährliche Neigungen von Fliesstrajektorien liegen beim Verhältnis Höhendifferenz/Trajektorienlänge = 0.14 (Extremfall Chamoli). Möglichkeiten des topographischen Rückhalts in Flachstrecken aber auch von Prozessketten (Flutwellen aus Seen, Aufnahme wasserhaltiger Lockergesteinsmassen, etc.; Mani et al. 2023) müssen mindestens qualitativ beurteilt werden. Mit den so ermittelten Ergebnissen können gegebenenfalls Prioritäten ermittelt, lokal detaillierte Modellrechnungen durchgeführt (Mergili et al. 2020, Mamot et al. 2021) und Beobachtungsprogramme definiert werden. Modellrechnungen zur zeitabhängigen Temperaturentwicklung im Bergesinneren und der damit verbundenen thermisch induzierten Stabilitätsreduktion (Bild 9) können vor allem auch für das Verständnis des Gefahrenpotenzials dieser klimagesteuerten, langfristigen Entwicklung hilfreich sein.

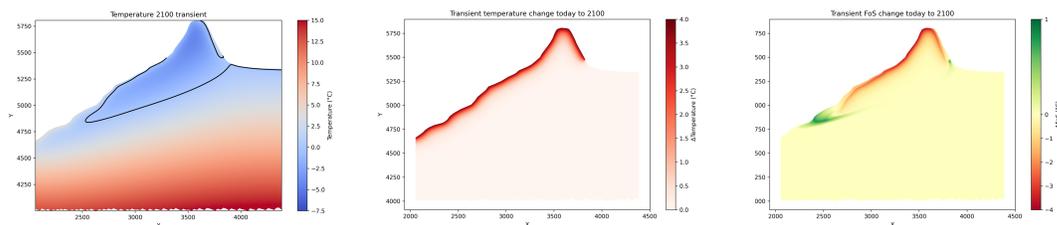


Bild 9: Beispiel (peruanischer Permafrost-Gipfel mit Bergsturz 2023) einer transienten 2D-Modellrechnung für das Ende des Jahrhunderts: Temperatur (links; schwarze Linie = 0°C), Temperaturänderung (mitte) und Stabilitätsänderung (rechts). Modellrechnung D. Cohen, unveröffentlicht.

4.5 Frost im Platzertalspeicher

Der geplante Speicher im Platzertal mit einer Dammhöhe auf rund 2400 m ü.M. und im Bergschatten der steilen, südlichen Bergflanken befindet sich selbst im Grenzbereich des alpinen Permafrostes (Blockgletscher im Talhintergrund). Beim Bau und Betrieb muss möglichen Frostaspekten Rechnung getragen werden: Der Damm selbst verursacht bergseitig – vor allem während der Bauphase – die Bildung eines Kaltluftsees, der die lokalen Temperaturen um mehrere $^\circ\text{C}$ absenken kann. In die gleiche Richtung wirkt grobes Blockwerk an der Dammoberfläche: Von alpinen Blockgletschern mit entsprechend grobblockigen Oberflächen ist bekannt (Amschwand et al. 2023), dass grosse Blöcke an der Oberfläche ein speziell kaltes Mikroklima bewirken, indem sie im Winter Wärme durch die isolierende Schneedecke hindurch in die Atmosphäre leiten, in ihren Zwischenräumen unter der isolierenden Schneedecke kalte Winterluft zirkulieren lassen und durch Einlagerung von Schnee in grossen Zwischenräumen eine Reserve latenter Energie speichern. Beim Gefrierprozess in frostempfindlichen Materialien (Silt, Feinsand) entstehen Eislinsen mit entsprechender Frosthebung und Tausetzung, resp. bei dauerhaftem Frost und Eisübersättigung Kriechvorgänge mit unlimitierter kumulativer Deformation.

5. Empfehlungen

Für die Nutzungen des Hochgebirgsraumes muss die Dynamik schneller und langfristig irreversibler klimagesteuerter Veränderungen der Gefahrensituation angemessen und integrativ abgeklärt werden. Im Rahmen des Betriebs und des als Pumpspeicherwerk geplanten Ausbaus Kaunertal/Platzertal sind für die Dauer der Konzession insbesondere zu beachten:

- Der Gletscherschwund und seine Auswirkung auf den Wasser- und Geschiebehalt des Einzugsgebietes.
- Die Bildung von neuen Seen am Gepatschferner und die Möglichkeit eines grosskalibrigen Sturzes in einen dieser Seen mit anschliessender Flutwelle zum Gepatsch-Speicher.
- Die thermisch induzierte Reduktion der Stabilität dauernd gefrorener Felsflanken und die zunehmende Eintretenswahrscheinlichkeit von grosskalibrigen Fels/Eisstürzen im Einzugsgebiet der Speicher und neuer Seen.
- Die Frostaspekte beim Bau und Betrieb des geplanten Platzertal-Speichers.

Für eine Zukunft rascher und irreversibler Veränderungen im Hochgebirge müssen bei der Planung neuer Infrastrukturprojekte potenzielle Naturgefahren und damit einhergehende Sicherheitsrisiken jenseits historisch-retrospektiver Erfahrung umfassend geprüft werden. Die vorliegende Kurzstudie dokumentiert den heutigen Wissensstand, definiert die wesentlichen Aspekte hinsichtlich klimagesteuerter Naturgefahren generell und für die Region Kaunertal/Platzertal spezifisch. In Anbetracht der sich tendenziell verändernden und verschärfenden Gefahrenpotenziale skizziert sie die unverzüglich abzuklärenden Aspekte.

Zürich, Februar 2025



Prof. em. Dr. Wilfried Haerberli

Geographisches Institut

Universität Zürich

Literatur

- Amschwand, D., Scherler, M., Hoelzle, M., Krummenacher, B., Haberkorn, A., Kienholz, C. and Gubler, H. (2024): Surface heat fluxes at coarse blocky Murtèl rock glacier (Engadine, eastern Swiss Alps). *The Cryosphere* 18 (4), 2103–2139. doi.org/10.5194/tc-18-2103-2024
- Biskaborn, B.K. and 47 co-authors (2019): Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications* 10 (264). doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4.
- Böckli, L., Brenning, A., Gruber, S. and Noetzli, J. (2012): Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. *The Cryosphere* 6: 807-820.
- Cathala, M., Magnin, F., Ravanel, L., Dorren, L., Zuanon, N., Berger, F., Bourrier, F. and Deline, P. (2024): Mapping release and propagation areas of permafrost-related rock slope failures in the French Alps: A new methodological approach at regional scale. *Geomorphology* 448 (2024) 109032. doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109032
- Davies, M. C. R., Hamza, O. and Harris, C. (2001). The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes* 12(1), 137–144. doi.org/10.1002/PPP.378
- Deline, P., Gruber, S., Amann, F., Bodin, X., Delaloye, R., Failletaz, J., Fischer, L., Geertsema, M., Giardino, M., Hasler, A., Kirkbride, M., Krautblatter, M., Magnin, F., McColl, S., Ravanel, L., Schoeneich, P., and Weber, S. (2021): Ice loss from glaciers and permafrost and related slope instability in high-mountain regions. In: Haeberli, W. and Whiteman, C. (eds): *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*, 501–540. doi.org/10.1016/B978-0-12-817129-5.00015-9
- Fischer, L., Purves, R. S., Huggel, C., Noetzli, J. and Haeberli, W. (2012): On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12(1), 241–254. doi.org/10.5194/nhess-12-241-2012
- Fleischer, F., Haas, F., Piermattei, L., Pfeiffer, M., Heckmann, T., Altmann, M., Rom, J., Stark, M., Wimmer, M.H., Pfeifer, N. and Becht, M. (2021): Multi-decadal (1953–2017) rock glacier kinematics analysed by high-resolution topographic data in the upper Kautneral, Austria. *The Cryosphere*, 15, 5345–5369. doi.org/10.5194/tc-15-5345-2021
- Furian, W., Maussion, F. and Schneider, C. (2022): Projected 21st-century glacial lake evolution in High Mountain Asia. *Frontiers in Earth Science* 10:821798. doi: 10.3389/feart.2022.821798
- Haeberli, W. and Drenkhan, F. (2022): Future lake development in deglaciating mountain ranges. *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.356
- Haeberli, W., Allen, S. and Frey, H. (2022). Estimating probabilities of occurrence related to impacts on glacial lakes from large rock-ice avalanches. *EGUGA, EGU22-2511*. doi.org/10.5194/EGUSPHERE-EGU22-2511
- Haeberli, W., Huggel, C., Kääh, A., Zraggen-Oswald, S., Polkvoj, A., Galushkin, I., Zotikov, I. and Osokin, N. (2004): The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002: an extraordinary event of historical dimensions in North Ossetia, Russian Caucasus. *Journal of Glaciology* 50/171, 533-546.
- Haeberli, W., Schaub, Y. and Huggel, C. (2017): Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology* 293, 405-417. doi.org:10.1016/j.geomorph.2016.02.009
- Hartl, L., Covi, F., Stocker-Waldhuber, M., Baldo, A., Fugazza, D., Di Mauro, B. and Naegeli, K. (2025): Loss of accumulation zone exposes dark ice and drives increased ablation at Weißseespitze, Austria. *EGU sphere preprint*. doi.org/10.5194/egusphere-2025-384
- Hartl, L., Schmitt, P., Schuster, L., Helfricht, K., Abermann, J. and Maussion, F. (2024): Recent observations and glacier modeling point towards near complete glacier loss in western Austria (Ötztal and Stubai mountain range) if 1.5°C is not met. *EGU preprint repository*. doi.org/10.5194/egusphere-2024-3146
- Hartl, L., Zieher, T., Bremer, M., Stocker-Waldhuber, M., Zahs, V., Höfle, B., Klug, C. and Cicoira, A. (2023): Multi-sensor monitoring and data integration reveal cyclical destabilization of the Äußeres Hochebenkar rock glacier. *Earth Surface Dynamics* 11, 117–147. doi.org/10.5194/esurf-11-117-2023
- Hoelzle, M., Hauck, C., Mathys, T., Noetzli, J., Pellet, C. and Scherler, M. (2022): Long-term energy balance measurements at three different mountain permafrost sites in the Swiss Alps. *Earth System Sciences Data* 14(4), 1531–1547. doi:10.5194/essd-14-1531-2022

- Hu, Y., Arenson, L.U., Barboux, C., Bodin, X., Cicoira, A., Delaloye, R., Gärtner-Roer, I., Kääh, A., Kellerer-Pirklbauer, A., Lambiel, C., Liu, L., Pellet, C., Rouyet, L., Schoeneich, P., Seier, G. and Strozz, T. (2025): Rock glacier velocity: An essential climate variable quantity for permafrost. *Reviews of Geophysics* 63, e2024RG000847. doi.org/10.1029/2024RG000847
- Kellerer-Pirklbauer, A., Bodin, X., Delaloye, R., Lambiel, C., Gärtner-Roer, I., Bonnefoy-Demongeot, M., Carturan, L., Damm, B., Eulenstein, J., Fischer, A., Hartl, L., Ikeda, A., Kaufmann, V., Krainer, K., Matsuoka, N., Cella, U. M. D., Noetzli, J., Seppi, R., Scapozza, C., Schoeneich, P., Stocker-Waldhuber, M., Thibert, E. and Zumiani, M. (2024): Acceleration and interannual variability of creep rates in mountain permafrost landforms (rock glacier velocities) in the European Alps in 1995–2022. *Environmental Research Letters* 19, 034022. doi.org/10.1088/1748-9326/ad25a4
- Kofler, C., Mair, V., Gruber, S., Todisco, M.C., Nettleton, I., Steger, S., Zebisch, M., Schneiderbauer, S. and Comiti, F. (2021): When do rock glacier fronts fail? Insights from two case studies in South Tyrol (Italian Alps). *Earth Surface Processes and Landforms* 46(7), 1311–1327. doi:10.1002/esp.5099
- Krainer, K., Bressan, D., Dietre, B., Haas, J.N., Hajdas, I., Lang, K., Mair, V., Nickus, U., Reidl, D., Thies, H. and Tonidandel, D. (2014): A 10,300-year-old permafrost core from the active rock glacier Lazaun, southern Ötztal Alps (South Tyrol, northern Italy). *Quaternary Research* 83 (2), 324–335. doi.org/10.1016/j.yqres.2014.12.005
- Krautblatter, M. and Leith, K. (2015): Glacier- and permafrost-related slope instabilities. In: Huggel, C., Carey, M., Clague, J.J. and Kääh, A. (eds.): *The High-Mountain Cryosphere – Environmental Changes and Human Risks*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 147–165.
- Krautblatter, M., Funk, D. and Günzel, F. K. (2013): Why permafrost rocks become unstable: a rock–ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms* 38(8), 876–887. doi.org/10.1002/ESP.3374
- Kühni, A. and Pfiffner, O.A. (2001): The relief of the Swiss Alps and adjacent areas and its relation to lithology and structure: topographic analysis from a 250-m DEM. *Geomorphology* 41, 285–307.
- Magnin, F., Haeberli, W., Linsbauer, A., Deline, P. and Ravanel, L. (2020): Estimating glacier-bed overdeepenings as possible sites of future lakes in the de-glaciating Mont Blanc massif (Western European Alps). *Geomorphology* 350. doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106913
- Mamot, P., Weber, S., Eppinger, S. and Krautblatter, M. (2021): A temperature-dependent mechanical model to assess the stability of degrading permafrost rock slopes. *Earth Surface Dynamics* 9, 1125–1151. doi:10.5194/esurf-9-1125-2021
- Mani, P., Allen, S., Evans, S.G., Kargel, J.S., Mergili, M., Petrakov, D. and Stoffel, M. (2023): Geomorphic process chains in high-mountain regions—A review and classification approach for natural hazards assessment. *Reviews of Geophysics* 61, e2022RG000791. doi.org/10.1029/2022RG000791
- Mergili, M., Jabeydoff, M., Pullarello, J. and Pudasaini, S.P. (2020): Back calculation of the 2017 Piz Cengalo–Bondo landslide cascade with r.avaflow: what we can do and what we can learn. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20, 505–520. doi.org/10.5194/nhess-20-505-2020
- Noetzli, J. and Gruber, S. (2009): Transient thermal effects in Alpine permafrost. *The Cryosphere* 3(1), 85–99. doi.org/10.5194/tc-3-85-2009
- Noetzli, J., Isaksen, K., Barnett, J., Christiansen, H.H., Delaloye, R., Etmüller, B., Farinotti, D., Galleman, T., Guglielmin, M., Hauck, C., Hilbich, C., Hoelzle, M., Lambiel, C., Magnin, F., Oliva, M., Paro, L., Pogliotti, P., Riedl, C., Schoeneich, P., Valt, M., Vieli, A. and Phillips, M. (2024): Enhanced warming of European mountain permafrost in the early 21st century. *Nature Communications*. doi.org/10.1038/s41467-024-54831-9
- Offer, M., Weber, S., Krautblatter, M., Hartmeyer, I. and Keuschnik, M. (2025): Pressurised water flow in fractured permafrost rocks revealed by borehole temperature, electrical resistivity tomography, and piezometric pressure. *The Cryosphere* 19, 485–506. doi.org/10.5194/tc-19-485-2025
- Otto, J.-C., Helfricht, K., Prasicsek, G., Binder, D. and Keuschnik, M. (2022): Testing the performance of ice thickness models to estimate the formation of potential future glacial lakes in Austria. *Earth Surface Processes and Landforms* 47, 723–741. doi:10.1002/esp.5266
- PERMOS (2024): *Swiss Permafrost Bulletin 2023*. Swiss Permafrost Monitoring Network PERMOS, May 2024.
- Pfluger, F., Weber, S., Steinhäuser, J., Zangerl, C., Fey, C., Fürst, J. and Krautblatter, M. (2025): Massive permafrost rock slide under a warming polythermal glacier deciphered through mechanical modeling (Bliggspitze, Austria). *Earth Surface Dynamics* 13, 41–70. doi.org/10.5194/esurf-13-41-2025
- Pierhöfer, L., Bartelt, P., Bühler, Y., Hafner, E., Kenner, R., Walter, F. und Phillips, M. (2024): Bergsturz vom 14. April 2024 am Piz Scerscen, Graubünden. SLF Ereignisanalyse im Auftrag des Amtes für Wald und Naturgefahren, Region Südbünden. 30pp.

- RGIK (2023): Guidelines for inventorying rock glaciers: baseline and practical concepts (version 1.0). IPA Action Group Rock glacier inventories and kinematics, 25 pp. doi: 10.51363/unifr.srr.2023.002
- Sattar, A., Allen, S., Mergili, M., Haerberli, W., Frey, H., Kulkarni, A.V., Haritashya, U.K., Huggel, C., Goswami, A. and Ramsankaran, R.A.A.J. (2023): Modelling potential glacial lake outburst flood process chains and effects from artificial lake-level lowering at Gepang Gath Lake, Indian Himalaya. *Journal of Geophysical Research – Earth Surface*. doi:10.1029/2022JF006826.
- Sattar, A., Cook, K. L., Rai, S.K., Berthier, E., Allen, S., Rinzin, S., Van Wyk de Vries, M., Haerberli, W., Kushwaha, P., Shugar, D.H., Emmer, A., Haritashya, U.K., Frey, H., Rao, P., Gurudin, K.S.K., Rai, P., Rajak, R., Hossain, F., Huggel, C., Mergili, M., Azam, M.F., Gascoin, S., Carrivick, J.L., Bell, L.E., Ranjan, R.K., Rashid, I., Kulkarni, A.V., Petley, D., Schwanghart, W., Watson, C.S., Islam, N., Gupta, M.D., Lane, S.N. and Bhat, S.Y. (2025): The Sikkim flood of October 2023: Drivers, causes and impacts of a multihazard cascade. *Science* 10.1126/science.ads2659
- Shugar, D. H., Burr, A., Haritashya, U. K., Kargel, J. S., Watson, C. S., Kennedy, M. C., Bevington, A. R., Betts, R. A., Harrison, S. and Strattman, K. (2020): Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990. *Nature Climate Change* 10(10), 939-945. doi.org/10.1038/s41558-020-0855-4.
- Shugar, D. H., Jacquemart, M., Shean, D., Bhushan, S., Upadhyay, K., Sattar, A., Schwanghart, W., McBride, S., de Vries, M. V. W., Mergili, M., Emmer, A., Deschamps-Berger, C., McDonnell, M., Bhambri, R., Allen, S., Berthier, E., Carrivick, J. L., Clague, J. J., Dokukin, M., Dunning, S. A., Frey, H., Gascoin, S., Haritashya, U. K., Huggel, C., Käab, A., Kargel, J. S., Kavanaugh, J. L., Lacroix, P., Petley, D., Rupper, S., Azam, M. F., Cook, S. J., Dimri, A. P., Eriksson, M., Farinotti, D., Fiddes, J., Gnyawali, K. R., Harrison, S., Jha, M., Koppes, M., Kumar, A., Leinss, S., Majeed, U., Mal, S., Muhuri, A., Noetzli, J., Paul, F., Rashid, I., Sain, K., Steiner, J., Ugalde, F., Watson, C. S. and Westoby, M. J. (2021): A massive rock and ice avalanche caused the 2021 disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science* eabh4455. doi:10.1126/science.abh4455
- Sosio, R., Crosta, G.B. and Hungr, O. (2008): Complete dynamic modelling calibration for the Thurwieser rock avalanche (Italian Central Alps). *Engineering Geology* 100 (1/2), 11-26.
- Wagner, T., Pleschberger, R., Kainz, S., Ribis, M., Kellerer-Pirklbauer, A., Krainer, K., Philippitsch, R. and Winkler, G. (2020): The first consistent inventory of rock glaciers and their hydrological catchments of the Austrian Alps. *Austrian Journal of Earth Sciences* 113(1), 1-23. doi:10.17738/ajes.2020.0001
- Walter, F., Amann, F., Kos, A., Kenner, R., Phillips, M., de Peux, A., Huss, M., Tognacca, C., Clinton, J., Diehl, T. and Bonanomi, Y. (2019): Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. *Geomorphology* 351: 106933. doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106933
- Zekollari, H., Huss, M., Schuster, L., Maussion, F., Rounce, D.R., Aguayo, R., Champollion, N., Compagno, L., Hugonnet, R., Marzeion, B., Mojtavavi, S. and Farinotti, D. (2024): Twenty-first century global glacier evolution under CMIP6 scenarios and the role of glacier-specific observations. *The Cryosphere* 18, 5045–5066. doi.org/10.5194/tc-18-5045-2024
- Zemp, M., Käab, A., Hoelzle, M. and Haerberli, W. (2005): GIS-based modelling of the glacial sediment balance. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.-Vol. 138*, 113-129.
- Zhang, G., Carrivick, J.L., Emmer, A., Shugar, D.H., Veh, G., Wang, X., Labedz, C., Mergili, M., Mölg, N., Allen, S., Sugiyama, S. and Lützow, N. (2024): Characteristics and changes of glacial lakes and outburst floods. *Nature Reviews Earth & Environment*. doi.org/10.1038/s43017-024-00554-w
- Zheng, G., Allen, S.K., Bao, A., Ballesteros-Cánovas, J.A., Huss, M., Zhang, G., Li, J., Yuan, Y., Jiang, L., Yu, T., Chen, W. and Stoffel, M. (2021): Increasing risk of glacial lake outburst floods from future Third Pole deglaciation. *Nature Climate Change*. doi:10.1038/s41558-021-01028-3