



av.geo.clim –
Vulnerable alpine Infrastruktur
im Klimawandel
Sensibilisierung im Naturraum

 Bundesministerium
Land- und Forstwirtschaft,
Klima- und Umweltschutz,
Regionen und Wasserwirtschaft

 Bundesministerium
Frauen, Wissenschaft
und Forschung



umweltbundesamt[®]



Projektmitarbeiter*innen und Autor*innen:

Marco Gabl, MSc.^{1,2}; Simon Landskron, MSc.²; Luca Korosec, BSc.²

Advisory:

Ing. Mag. Martin Ladner, PhD²; a.o. Univ.-Prof. Mag. Dr. Armin Heller²; Dr. Wolfgang Stock³

¹ Österreichischer Alpenverein

² Institut für Geographie, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck

³ Büro für Freizeitrecht



Diese Publikation sollte folgendermaßen zitiert werden:

Gabl, M.; Ladner, M.; Korosec, L.; Landskron, S.; Heller, A. & Stock, W. (2025): av.geo.clim – Vulnerable alpine Infrastruktur im Klimawandel. Sensibilisierung im Naturraum. Endbericht von StartClim2024.G in StartClim2024: Extremereignisse, Ökosysteme und gerechte Transformation, Auftraggeber: BMLUK, BMFWF, Klima- und Energiefonds, Land Oberösterreich.

Wien, im September 2025

Druck, November 2025

StartClim2024.G

Teilprojekt von StartClim2024

Projektleitung von StartClim:

BOKU University, Department für Ökosystemmanagement, Klima und Biodiversität

Institut für Meteorologie und Klimatologie, Gregor-Mendel-Straße 33, 1180 Wien

www.startclim.at

StartClim2024 wurde aus Mitteln des BMK, BMFWF, Klima- und Energiefonds und dem Land Oberösterreich gefördert.

Inhaltsverzeichnis

G-1 Kurzfassung.....	5
G-2 Abstract.....	6
G-3 Problemstellung.....	7
G-4 Zielsetzung.....	8
G-5 Wissenschaftliche Grundlagen.....	10
G-5.1 Das alpine Wegenetz.....	10
G-5.2 Alpine Naturgefahren	10
G-5.2.1 Gravitative Naturgefahren.....	11
G-5.2.2 Fluviaatile Prozesse.....	14
G-5.3 Klimawandel in den österreichischen Alpen.....	14
G-5.3.1 Auswirkungen auf die alpinen Naturgefahren	19
G-5.3.2 Auswirkungen auf das alpine Wegenetz.....	21
G-6 Pilotregion.....	22
G-7 Methoden	23
G-7.1 Analyse der Akteursgruppen.....	24
G-7.2 Fern-, Fremd- und Felderkundung (3F-Methode).....	25
G-7.3 Bewertungspfade (Gefahrenpotential).....	26
G-7.4 Digitaler Survey.....	28
G-7.5 Gefahrenpotentialkarten	30
G-7.6 StoryMaps	31
G-8 Expert:innenworkshop	33
G-8.1 Teilnehmer und Ablauf	33
G-8.2 Zentrale Erkenntnisse und Impulse	33
G-8.3 Fazit zum Expertenworkshop.....	34
G-9 Ergebnisse und Diskussion.....	36
G-9.1 Bewertungspfade	36
G-9.2 Digitaler Survey.....	38
G-9.3 Gefahrenpotentialkarten	40
G-9.4 StoryMaps	43
G-10 Fazit und Ausblick.....	45
G-11 Literaturverzeichnis.....	47
G-12 Anhang	51

Abbildungsverzeichnis

Abb. G-1: Kernkonzepts des Projekts av.geo.clim	5
Abb. G-2: Projektkonzept und Einbettung in den thematischen Kontext	9
Abb. G-3: Geschiebe- und abflussbeeinflussende Negativfaktoren (verändert nach Gertsch, 2009: 73)	13
Abb. G-4: Änderungen der saisonalen Mitteltemperatur [°C] in Österreich im Zeitraum 1986-2010 (Chimani et al., 2016)	15
Abb. G-5: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Österreich mit gemessenen Werten für den Zeitraum 1961 bis 2018 sowie Projektionen bis 2100 (Olefs et al., 2021; aktualisiert nach Chimani et al., 2016)	15
Abb. G-6: Prognostizierter Verlauf der jahreszeitlichen Änderung der Temperatur [°C] in Relation zur Höhenlage in den Alpen für die Jahre 2070–2099 (verändert nach Gobiet et al., 2014)	16
Abb. G-7: Änderungen der saisonalen Niederschlagssumme [%] in Österreich im Zeitraum 1986-2010 ohne kleinräumige (< 10 km ²) Niederschläge (Chimani et al., 2016)	16
Abb. G-8: Saisonale Veränderung der Niederschlagseigenschaften [%] zwischen 1981–2010 und 2070–2099 für die nordöstlichen Alpen, für drei Emissionsszenarien (verändert nach Kotlarski et al., 2023: 75)	17
Abb. G-9: Prognostizierte Veränderungen ausgewählter Naturgefahren für Österreich (verändert nach APCC, 2025: 61)	19
Abb. G-10: Auswirkungen klimawandelbeeinflusster Naturphänomene im Hochgebirge auf das dortige Routen- und Wegenetz (Braun, 2009: 36)	21
Abb. G-11: Übersicht der Pilotregion und historische Entwicklung des Wegenetzes	22
Abb. G-12: Methodischer Workflow der im Projekt entwickelten Werkzeuge	23
Abb. G-13: Übersicht der im Projekt av.geo.clim definierten Akteursgruppen	24
Abb. G-14: Schematische Darstellung der Faktoren, welche in ihrer Kombination das Gefahrenpotential auf Wanderwegen beeinflussen (nach Lanskron, 2024)	26
Abb. G-15: Bewertungspfad für gravitative Sturzereignisse (verändert nach Lanskron, 2024)	28
Abb. G-16: Schematische Darstellung der einzelnen Abschnitte des digitalen Surveys	29
Abb. G-17: Bildschirmaufnahme aus der StoryMap zu alpinen Naturgefahren und Klimawandel in den Alpen	32
Abb. G-18: Bewertungspfad für Rutschungs- und Hangmurprozesse (nach Lanskron, 2024)	37
Abb. G-19: Bildschirmaufnahme des digitalen Erfassungsformulars	39
Abb. G-20: Bildschirmaufnahme der Echtzeit-Webkarte im digitalen Survey	40
Abb. G-21: Gefahrenpotentialkarte der Pilotregion für das Jahr 2024	41
Abb. G-22: Für illustrative Zwecke entwickelte hypothetische Gefahrenpotentialkarte für das Jahr 2045	43
Abb. G-23: Bildschirmaufnahme der Map-Tour aus der StoryMap zu alpinen Naturgefahren	44
Abb. G-24: Anhang: Erste Seite der begleitenden Kurzdokumentation	51
Abb. G-25: Anhang: Zweite Seite der begleitenden Kurzdokumentation	52
Abb. G-26: Anhang: Begleitendes Read-Me vor der Anwendung des digitalen Erfassungsformular	53
Abb. G-27: Anhang: Bewertungspfad für Gerinnemurereignisse (verändert nach Lanskron, 2024)	54
Abb. G-28: Anhang: Bewertungspfad für Hochwasser-/Sturzflutereignisse (verändert nach Lanskron, 2024). 55	

Tabellenverzeichnis

Tab. G-1: Klassifikation von Sturzprozessen nach ihrer Dimension (verändert nach BUWAL, 2016: 80)	11
--	----

G-1 Kurzfassung

Der Klimawandel ist in den Alpen längst spürbare Realität. Gletscher verschwinden, Extremwetter nehmen zu und der Permafrost taut auf. Dadurch kommt es immer häufiger zu alpinen Naturgefahrenereignissen. Muren, Steinschläge und Rutschungen beschädigen dabei nicht nur verstärkt das alpine Wander- und Bergwegenetz, sondern gefährden auch die Sicherheit der Wandernden. Gleichzeitig verlängern trockenere Sommer und schneearme Winter die Bergsaison – der Nutzungsdruck auf das Wegenetz nimmt weiter zu. Für die verantwortlichen Wegewart:innen bedeutet das einen steigenden Aufwand an umfassendem Monitoring und anspruchsvollen Instandhaltungsmaßnahmen.

Genau hier setzen die Werkzeuge und Methoden von av.geo.clim an: Über ein digitales Erfassungsformular können Wegewart:innen und geschulte Beobachter:innen von Naturgefahren ausgehende Gefahrenpotentiale und Ereignisse im Gelände systematisch erfassen. Mittels Bewertungspfaden werden diese klassifiziert und in eine Karte überführt, die nunmehr aktuelle Naturgefahren mit erhöhtem Potential übersichtlich darstellt. So entsteht eine fundierte Entscheidungsgrundlage für Wegehalter:innen – und ein einfacher verständliches Werkzeug für Wandernde, das hilft, Risiken frühzeitig zu erkennen und verantwortungsbewusst zu handeln.

Ergänzend wurden StoryMaps entwickelt, die besonders Wanderneulingen und weniger erfahrenen Bergsportler:innen grundlegendes Wissen rund ums Wandern, alpine Naturgefahren und den Klimawandel niederschwellig vermitteln.

Durch die Verbindung von Information, Prävention und Schutz leistet av.geo.clim einen nachhaltigen Beitrag zur Sicherheit im alpinen Raum – damit die Bergwelt auch in Zeiten des Klimawandels erlebbar bleibt.

Schlagwörter: [alpine Wanderinfrastruktur](#), [Klimawandelsensibilisierung](#), [Naturgefahren](#), [Gefahrenmanagement](#), [We gesicherheit](#), [digitaler Survey](#), [Gefahrenpotentialkarte](#), [Gefahrenkommunikation](#)



Abb. G-1: Kernkonzepts des Projekts av.geo.clim: Wegewart:innen erfassen Gefahrenstellen entlang alpiner Wege mit einem entwickelten digitalen Formular. Die erhobenen Daten werden von Expert:innen aufbereitet und über Gefahrenpotentialkarten sowie interaktive StoryMaps zielgruppenspezifisch kommuniziert, um Wandernde für Naturgefahren und die Folgen des Klimawandels zu sensibilisieren.

G-2 Abstract

Climate change has long become a tangible reality in the Alps. Glaciers are retreating, extreme weather events are increasing, and permafrost is thawing. As a result, alpine natural hazard events are becoming more frequent. Debris flows, rockfalls, and landslides are increasingly damaging the alpine hiking and mountain trail network and pose a growing risk to the safety of hikers. At the same time, drier summers and winters with little snow are extending the hiking season, placing additional pressure on trail infrastructure. For those responsible for trail maintenance – particularly trained trail wardens – this means a rising demand for comprehensive monitoring and complex maintenance measures.

This is where the tools and methods of av.geo.clim come into play. Using a digital reporting form, trail wardens and trained observers can systematically record natural hazard potentials and events in the field. Through structured evaluation pathways, these observations are classified and translated into a cartographic representation that clearly displays current natural hazards with elevated risk potential. The result is a robust basis for decision-making for trail managers – and an easily accessible tool for hikers to identify risks early and act responsibly.

In addition, interactive StoryMaps have been developed to convey basic knowledge about hiking, alpine natural hazards, and climate change in an accessible format, especially for novice and less experienced mountaineers.

By integrating information, prevention, and protection, av.geo.clim makes a sustainable contribution to safety in alpine regions – helping ensure that mountain landscapes remain accessible and enjoyable, even in the face of climate change.

G-3 Problemstellung

Das Abschmelzen der Gletscher ist eines der offensichtlichen Anzeichen, dass der Klimawandel in der Gebirgswelt bereits seinen Tribut fordert. Sommer wie Winter werden ebenfalls merklich wärmer, die durchschnittliche Erwärmung der Lufttemperatur in Österreich seit Beginn des 20. Jahrhunderts in Höhe von +1,8 °C wird sich voraussichtlich bereits in den kommenden drei Dekaden annähernd verdoppeln (Olefs et al., 2021). Der Gletscherbestand ist stark rückgängig, die Schmelzprozesse in den Frühlings- und Sommermonaten nehmen stark zu. Im hochalpinen Bereich als 'Kitt' zwischen Felsflächen fungierender und zum generellen Gleichgewicht der Hangstabilität beitragender Permafrost taut auf und führt zu instabilen Untergründen und Felswänden (Otto et al., 2020a). Extremwetterereignisse wie Stürme und intensive Regenfälle, aber auch langanhaltende Trockenperioden treten vermehrt auf (APCC, 2025).

Parallel dazu finden als direkte Folge Veränderungen in den Prozessdynamiken der lokalen Naturphänomene statt, was unter anderem mit einem veränderten und intensivierten Auftreten von Naturgefahrenereignissen einhergeht (u.a. Glade, 2020; Gobiet et al., 2014). Gleichzeitig wird der alpine Raum zu Freizeit- und Erholungszwecken von zunehmend mehr Menschen genutzt (Pröbstl-Haider et al., 2021). Sowohl für das menschliche Nutzungsverhalten als auch für die Reaktionen der Naturphänomene auf den Klimawandel wird prognostiziert, dass sie sich in ihren jeweiligen Ausprägungen verstärken werden. Dies hat zur Folge, dass in ihrem gemeinsamen räumlichen Schnittpunkt, dem Hochgebirge, Berggeher:innen vermehrt auf direkt gefährdende Naturgefahrenereignisse bzw. deren Folgen treffen werden (Bast et al., 2020). Es entsteht eine 'multi-risk' Konfliktsituation, für deren Lösung verschiedene Ansätze gefordert werden (vgl. Carpignano et al., 2009).

Im Grunde ist jeder Mensch im Gebirge dazu angehalten, eigenverantwortlich vernünftige, der Situation angepasste Entscheidungen zu treffen und somit Gefahren möglichst zu minimieren. Anhand des gegenwärtigen Trends, dass sich immer mehr Menschen in hochalpinen Gefilden bewegen, kann auch angenommen werden, dass sich darunter eine steigende Anzahl bergunerfahrener Wander:innen befindet. Diese Gruppe ist den dort auftretenden Risiken besonders ausgesetzt, da mangels Erfahrung und Kenntnis der für sie neuen Umgebung grundlegende Entscheidungsfaktoren fehlen. Niederschwellige Angebote zur Information und Sensibilisierung sind daher von großer Wichtigkeit. Wollen diese eine nachhaltige Wirkung erzielen, sollten sie das Interesse der Zielgruppe wecken und die intrinsische Motivation der Individuen fördern (vgl. Ryan & Deci, 2000).

Hinzu kommt das Problem des Missverhältnisses zwischen dem steigenden Instandhaltungsbedarf des Wegenetzes und den zur Verfügung stehenden personellen Ressourcen: Derzeit ist ein Rückgang des ehrenamtlichen Engagements im Bereich der Wegewartung zu verzeichnen, während gleichzeitig die Schäden durch veränderte Umweltbedingungen zunehmen. Seit einigen Jahren schon häufen sich Wegsperrern und veränderte Wegpassagen durch Neuanlegungen, da entweder die Schäden nicht mehr repariert werden können oder die Sicherheit nicht mehr gewährleistet werden kann. Auch dieses Problem wird sich in Zukunft verschärfen, wenn man die künftige Intensivierung von Naturereignissen und zunehmenden Nutzungsdruck durch mehr Wandernde berücksichtigt. Umfangreiche bauliche Maßnahmen zum Schutz der Wanderinfrastruktur und deren Nutzer zu errichten, ist im Hochgebirge weder umsetzbar noch zweckmäßig.

G-4 Zielsetzung

Der aktuellen Klimawandelproblematik entsprechend wird in gegenwärtigen Forschungen und Projekten zum Thema Naturgefahren, Klimawandel und Naturraumnutzung stets darauf verwiesen, dass bereits jetzt und insbesondere zukünftig ein großer Bedarf an wirksamen Werkzeugen zu Gefahrenidentifikation besteht (u.a. CCCA, 2023; Hinderling et al., 2021b; Preh et al., 2020) und gleichzeitig die Kommunikation mit den Akteursgruppen von essentieller Bedeutung ist (u.a. Braun, 2009; Pröbstl-Haider et al., 2021; Hinderling et al., 2021a). Um den Sicherheitsanforderungen der Naturraumnutzung im Gebirge unter Berücksichtigung aktueller und zukünftiger (klimatischer, geomorphologischer und touristischer) Entwicklungen gerecht zu werden, wird auf einen dualen Ansatz gesetzt: Gefahrenstellen an Wanderwegen sollen lokalisiert und aufbereitet werden, was neue Handlungs- und Kommunikationsmöglichkeiten eröffnen soll. Auf dieser Basis können dann mithilfe eines zielgerichteten Wissenstransfers die verschiedenen lokalen Akteursgruppen über die Thematik informiert und für die Problematik sensibilisiert werden. Dadurch soll die Eigenverantwortung gestärkt und mögliche Schadensereignisse präventiv vermieden werden. Dies untersteht dem höher gerichteten Ziel, auch in herausfordernden Zeiten der globalen Erwärmung – oder gerade deswegen – die Sicherheit im zunehmend genutzten Gebirgsraum langfristig zu gewährleisten und Gefahren zu reduzieren.

Um die Zielsetzung zu erreichen und gleichzeitig das komplexe Themengebiet umfassend zu berücksichtigen, wird ein multimethodisches Konzept verfolgt (Abb. G-2). Dabei werden partizipative Feldmethoden, digitale Instrumente und kommunikationsorientierte Strategien kombiniert angewandt.

Auf aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen aufbauend und die dynamischen Umweltbedingungen in Gebirgsräumen miteinbeziehend wird ein Tool in Form eines digitalen Surveys entwickelt, welcher bei simpler, praxisorientierter Anwendung einen mehrfach verwendbaren Output generieren kann. Er soll primär dabei helfen, eine Datenbank aufzubauen, welche Informationen zu den von ausgewählten Naturgefahren beeinflussten Gefahrenstellen auf Gebirgswegen beinhaltet. Die Bereitstellung von klassifizierten Informationen kann einen Beitrag zur Erhaltungsarbeit der Wege leisten und als Grundlage für die Erstellung einer Gefahrenpotentialkarte dienen.

Die Karte zielt darauf ab, die verschiedenen Wegenutzer:innen über Gefahrenzonen zu informieren und sie dabei zu unterstützen, das von Naturgefahren ausgehende Risiko eigenständig zu interpretieren und somit zu senken. In der Anwendung fördert die Karte die drei wichtigsten selbstaktiven Maßnahmen von Wandernden zur Gefahrenvermeidung (1. sorgfältige Tourenplanung, 2. angepasstes Verhalten, 3. Verwendung von geeignetem und aktuellem Karten- und Informationsmaterial) (Pröbstl & Damm, 2009). Zudem ist auch die Perspektive miteingebunden, zukünftige (klimawandelbedingte) Veränderungen des Gefahrenpotentials an den untersuchten Wegabschnitten darzustellen und einen weiteren Aufklärungspunkt zum Thema Klimawandel zu schaffen.

Um auf die verschiedenen Anforderungen des breiten Spektrums an Nutzer:innen im Gebirge eingehen zu können und so eine größere Wirksamkeit zu entfalten, sollen parallel dazu StoryMaps entstehen, welche thematische Inhalte zielgruppenspezifisch und anwendungsorientiert vermitteln können. Dies setzt voraus, dass die relevanten Akteursgruppen identifiziert und charakterisiert werden. Aufgrund des limitierten Projektrahmens ist es nicht möglich, auf die Gesamtheit der akteursgruppenbedingten Spezialanforderungen sowie auf die dazu angedachten Methodenfunktionalitäten im Projektverlauf einzugehen. Stattdessen wird sich auf eine initiale Basis beschränkt, die als Prototyp exemplarisch für die eingesetzten Methoden der wissenschaftlichen Kommunikation angesehen werden kann. Das Produkt soll dabei im Zuge der Implementierung zuerst dort ansetzen, wo durch einen hohen Kommunikationsbedarf die größte Wirkung entfaltet werden kann.

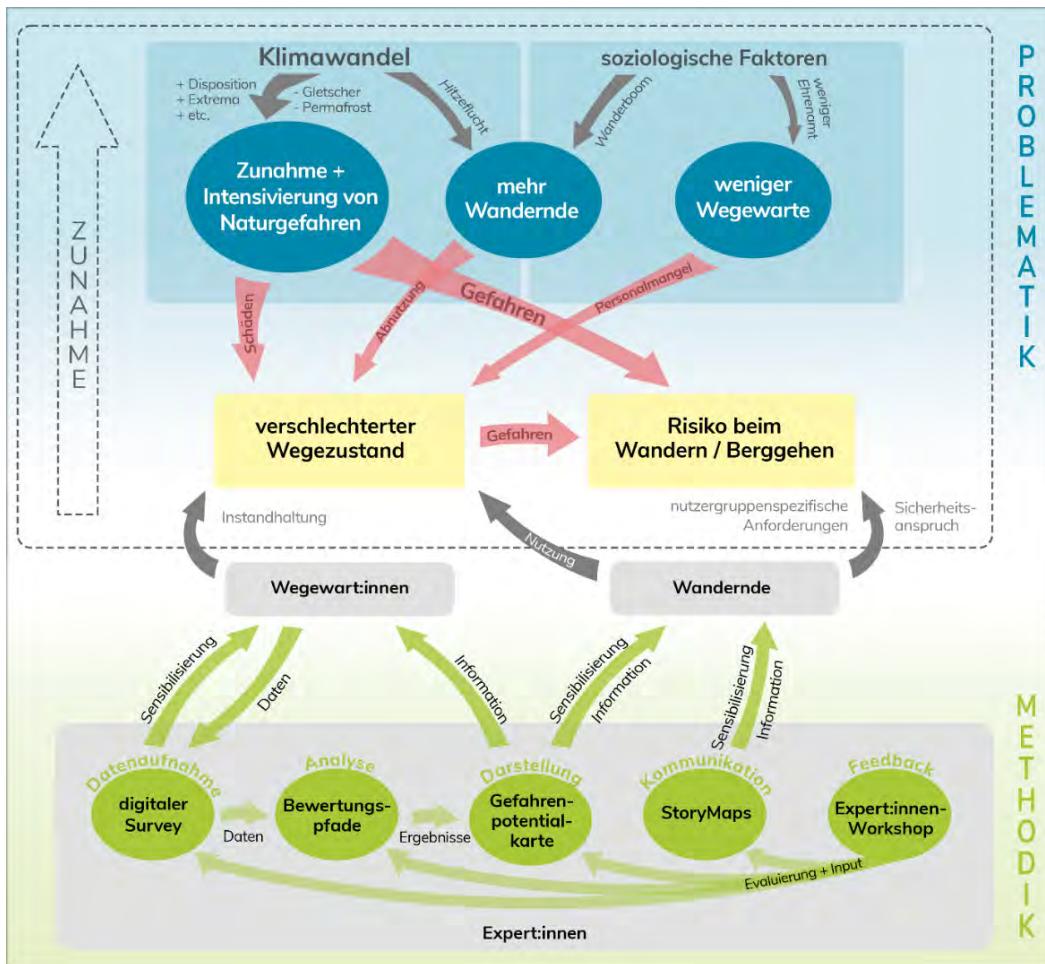


Abb. G-2: Projektkonzept und Einbettung in den thematischen Kontext: Aktuelle und zukünftige Zustände (graue Pfeile) im Schnittbereich zwischen Klimawandel, Gebirgsraum und Wandern führen zu einer Problematik (rote Pfeile) für Wandernde und Wegewart:innen. Dahingehend soll durch einen horizontalen und vertikalen Wissens- bzw. Datentransfer (grüne Pfeile) auf die betroffenen Akteur:innen eingegangen werden, um die Konsequenzen der zukünftigen Entwicklungen abzufedern. Um dies zu erreichen, werden mehrere ineinander greifende Methoden entwickelt.

Die Zielsetzung teilt sich auf mehrere Punkte auf:

- **Instrumente, Produkte und Methoden:** Erarbeiten von Methoden zur Aufnahme, Verarbeitung und Darstellung von Daten, welche auf die Problematik von Naturgefahren auf Wanderwegen eingehen; Identifizierung und Charakterisierung der relevanten Akteursgruppen
- **Wissenstransfer:** Bereitstellung zielgerichteter Sensibilisierungs- und Informationsmaterialien hinsichtlich des Wanderns sowie Naturgefahren und Klimawandel im Gebirge
- **Gesellschaftlicher Nutzen:** Erhöhung der Sicherheit im Gebirgsraum durch Gefahrenminimierung und Stärkung der Eigenverantwortung; Unterstützung bei der Erhaltung der Wegeinfrastruktur

Die Erarbeitung der Methodik, erste Anwendungen und Ergebnisfindungen werden in einer übersichtlichen Pilotregion durchgeführt, welche mit ihren Charakteristika und Voraussetzungen als Repräsentant für die österreichischen Alpen gelten soll.

Zur Unterstützung der Zielumsetzung wird ein Expert:innenworkshop organisiert, der wertvolle Inputs liefern und möglicherweise neue, bisher unberücksichtigte Perspektiven aufzeigen soll. Das Projekt kann dadurch in der Praxislandschaft präziser verortet und hinsichtlich seiner Qualität bezogen auf den anwendungsspezifischen Nutzen optimiert werden.

G-5 Wissenschaftliche Grundlagen

In diesem Kapitel werden die dem Projekt zugrunde liegenden wissenschaftlichen Konzepte und Erkenntnisse zusammengefasst. Dies ermöglicht es, die im Projekt angewandten Verfahren im Kontext aktueller Forschungsstände verständlich einzuordnen und die Rahmenbedingungen des Projekts nachvollziehbar zu machen.

G-5.1 Das alpine Wegenetz

Das Wander- und Bergwegenetz des Österreichischen Alpenvereins umfasst heute eine Gesamtlänge von ungefähr 26.000 Kilometer. Die Wege der Alpinen Vereine entstanden beginnend der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts bis zum Ausbruch des Ersten Weltkriegs. Die Zeit um 1850 markiert gleichzeitig das Ende der sogenannten 'Kleinen Eiszeit' (Little Ice Age) und den Beginn einer globalen Temperaturzunahme. Das alpine Wegenetz und die Schutzhütten der Alpenvereine bilden die infrastrukturelle Basis für den Bergtourismus (Bergwandern, Bergsteigen) in den Ostalpen. Die Attraktivität des Wander- und Bergtourismus wird maßgeblich durch die Qualität und Sicherheit des Wegenetzes, die Attraktivität der Landschaft und die Qualität der Schutzhütten bestimmt. Die Instandhaltung und Wartung der Wanderwege erfolgen zum größten Teil ehrenamtlich, dennoch müssen jährlich rund 1,3 bis 1,6 Millionen Euro in die Erhaltung investiert werden, Tendenz steigend. Der ÖAV-Katastrophenfonds, eingerichtet für unvorhersehbare, dringende Sanierungsmaßnahmen, musste in den letzten fünf Jahren vervierfacht werden.

Ungefähr 1.200 Wegewart:innen tragen Sorge, dass sich die Alpenvereinswege in einem ordnungsgemäßen Zustand befinden. Sie haben dabei eine große Verantwortung, sowohl gegenüber den Wegbenutzer:innen als auch gegenüber ihrem Zweigverein. Das Hütten- und Wegenetz der Alpenvereine ist heute nicht nur die tragende Säule des Bergsports und des Sommertourismus im Ostalpenraum, sondern auch die effektivste Besucherlenkung. Gut erhaltene und markierte Wege erhöhen die Sicherheit der Erholungssuchenden und verringern die Notwendigkeit von Such- und Bergrettungseinsätzen. Aufgrund der besonderen Bedingungen im Hochgebirge ist es so gut wie ausgeschlossen, einen Weg stets in völlig gefahrlosem Zustand zu halten. Dies muss jeder:m Benutzer:in bekannt sein. Die Nutzer:innen eines Bergweges handeln in erster Linie eigenverantwortlich. Ein Schutz ist insbesondere vor atypischen Gefahren zu gewährleisten. Die typischen Gefahren (z.B. üblicher Steinschlag, Wettergefahren) müssen die Freizeitsportler:innen selbst bewältigen.

Alpine Wege sind zunehmenden Naturgefahren und Erosion, aber auch einer zunehmenden intensiveren Nutzung ausgesetzt, nicht zuletzt durch die Erschließung von kühlen Gunsträumen und die Verlängerung der Wandersaison.

G-5.2 Alpine Naturgefahren

In alpinen Regionen kommen natürliche Prozesse wie Steinschlag, Muren, Rutschungen oder Lawinen aufgrund des steilen Reliefs und großer Höhenunterschiede gehäuft vor. Zur Gefahr für den Menschen und seine Infrastruktur werden sie erst, wenn sie mit dem menschlichen Handlungsräum kollidieren – so etwa entlang des alpinen Berg- und Wanderwegenetzes.

Angesichts der Vielzahl an Naturgefahren im Gebirge fokussiert sich das Projekt auf eine Auswahl, die die Zielsetzungen sinnvoll abdeckt. Behandelt werden daher jene Gefahrenprozesse, denen alpine Wege während der Hauptwandersaison (Mai bis Oktober) regelmäßig ausgesetzt sind und die gemäß dem Wegehandbuch (DAV & ÖAV, 2016) Personen und Wanderinfrastruktur unmittelbar oder mittelbar gefährden.

Die untersuchten Naturphänomene stehen dabei häufig in Wechselwirkung: Auslösefaktoren, Prozessmaterial und Raum überlagern sich, sodass sich Gefahren gegenseitig bedingen können. So begünstigen gravitative Sturzprozesse etwa die Bildung von Gerinnemuren, oder Hochwasser-

ereignisse führen zu verstärktem Geschiebetransport. In der Folge entstehen Prozessketten, bei denen ein schadensrelevantes Ereignis durch ein vorangehendes ausgelöst oder verstärkt wird.

Form, Magnitude und Zeitpunkt eines Ereignisses ergeben sich aus dem Zusammenspiel mehrerer Faktoren in einem komplexen Ursache-Wirkungs-Gefüge. Die Anfälligkeit eines Gebiets gegenüber Veränderungen im Reliefsystem im zeitlichen Verlauf wird durch seine Disposition beschrieben: Die Grunddisposition bezeichnet die generelle Bereitschaft eines Prozessabgangs durch das Vorhandensein bzw. den langfristigen Zustand der Umgebung (z.B. die geologischen Eigenschaften eines Anbruchgebiets gravitativer Sturzereignisse). Die variable Disposition beschreibt temporäre Veränderungen lokaler Bedingungen, etwa eine erhöhte Bodenfeuchte während der Schneeschmelze, die flächenhafte Fließprozesse begünstigt oder einschränkt. Ein Ereignis tritt dann ein, wenn ein Auslösefaktor oder -event (Trigger) die Belastungsgrenze der aktuell vorliegenden Disposition überschreitet. Während bei niedriger Disposition nur starke Trigger ein Ereignis auslösen, genügen bei hoher Disposition bereits geringe Auslöser (Kienholz, 2005).

G-5.2.1 Gravitative Naturgefahren

Felssturz, Block- und Steinschlag

Gravitative Sturzprozesse wie Steinschlag, Blockschlag oder Felssturz sind schnelle Massenbewegungen, bei denen sich Gesteinsmaterial durch Verwitterung, Temperaturänderungen, den Reibungswiderstand verringerndes oder den hydrostatischen Druck erhöhendes Wasser und mechanische Einwirkungen aus Hängen und Wänden abrupt löst. Dabei treten je nach Ausgangsvoraussetzung der geologisch-lithologischen Faktoren variierende Auslösemechanismen (vgl. Poisel, 2018) auf. Die Dynamik der Bewegung wird entscheidend durch physikalische Parameter wie Form, Größe, Festigkeit und Reibungsverhältnisse der Gesteinsmassen in Wechselwirkung mit der lokalen Oberflächenbeschaffenheit (z.B. Hangneigung, Rauigkeit, Elastizität) beeinflusst. Dabei sind während des Sturzereignisses die Bewegungsformen Fallen, Springen, Rollen und Gleiten möglich (Volkwein et al., 2011). Das Zusammenwirken dieser Faktoren führt zu vielfältigen Erscheinungsformen dieser Naturereignisse, die von punktuellen (linienhaften) Einzelereignissen bis hin zu durch Fragmentierung oder Parallelauslösungen großflächig wirkenden Prozessen reichen.

Tab. G-1: Klassifikation von Sturzprozessen nach ihrer Dimension (verändert nach BUWAL, 2016: 80)

Prozess	Durchmesser der Komponente [cm]	Volumen [m³]	Geschwindigkeit [m/s]	Bemerkung
Steinschlag	< 50	-	< 30	i. d. R. Einzelsteine pro Ereignis
Blockschlag	≥ 50	< 100	< 30	i. d. R. Einzelblöcke pro Ereignis
Felssturz	-	> 100 und < 1.000.000	10 bis 40	Felssturzmasse, i. d. R. Sturz einer Vielzahl von Fels- und Gesteinsblöcken, anschließend Fragmentierung. Felsstürze können sich in verschiedenen Phasen ereignen (Teilabbrüche).
Bergsturz	-	> 1.000.000	> 40	Initialphase mit kompakter Bergsturzmasse. Prozessraum inkl. Ablagerungszone kann große Flächen betreffen.

Im vorliegenden Projekt werden die Sturzprozesse in Anlehnung an BUWAL (2016) nach der Dimension der Sturzprozesse (Tab. G-1) differenziert. Bei Stein-/Blockschlügen wird dabei von identischen Prozessdynamiken ausgegangen, wobei jeweils bestimmte Größen der Sturzmasse dominieren. Das entsprechende Pendant kann dabei ebenfalls, jedoch in untergeordneter Weise, vorkommen. Felsstürze gehen in der Regel als Gesteinspakete mit großen Volumina ab und fragmentieren im Prozessverlauf (Preh et al., 2020). Sie werden in dieser Studie zur Vereinfachung der Projektmethodik daher nicht gesondert betrachtet, sondern fließen über ihre als Blockschlag behandelten Fragmente indirekt in die Naturgefahrenbewertung mit ein. Bergstürze sind im Projektmaßstab weder erfassbar noch relevant und werden somit an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt. Aufgrund hoher Geschwindigkeiten und Intensitäten sowie einer bisweilen breiten Streuwirkung stellen Sturzereignisse – unabhängig von ihrer Magnitude – eine große unmittelbare Gefahr für Personen dar. Auch kleinere Ereignisse, die insbesondere mit einer höheren Eintrittswahrscheinlichkeit einhergehen, können bereits eine große Schadenswirkung für Menschen haben. Ereignisse größerer Magnituden können ernsthafte Schäden an der Infrastruktur verursachen.

Gerinnemuren

Murgänge sind schnell fließende Massenbewegungen (5–10 m/s) aus einem Gemisch von Wasser und einem überwiegenden Anteil an Feststoffen (bis zu 70 %) (Kaitna et al., 2020). Das Fließverhalten variiert in Abhängigkeit von Menge und Zusammensetzung des mitgeführten Materials – in etwa Fein- und Bodenanteile, Gesteinsbrocken sowie organische Substanzen (z. B. Holz) – zwischen turbulent-flüssig bei hohem Wasseranteil und pulsierend-viskos bei hohem Feststoffanteil (Lehmann, 1993).

Aufgrund ähnlicher bzw. sich teilweise überlagernde Voraussetzungen, Abläufe und Auswirkungen werden schnell ablaufende Schuttströme ebenfalls als Murgänge behandelt. Zur besseren Differenzierung gegenüber Hangmuren (siehe nächster Absatz) werden diese beiden Prozessausprägungen fortan unter dem Begriff Gerinnemuren zusammengefasst.

Grundvoraussetzungen für das Auftreten von Murgängen sind ein steiles Gelände (15°–40°) mit ausreichender Reliefenergie, Höhenlage sowie das Vorhandensein von Lockermaterial (z. B. Schutt, instabile Böden oder gestörtes Festgestein) (Rickenmann, 2014; Gertsch, 2009). Besonders anfällig sind dabei vegetationsarme, exponierte Standorte. Zusätzlich beeinflussen variable Faktoren wie Bodenfeuchte, Verklausungen, Jahreszeit oder Materialverfügbarkeit (v.a. in Jungschuttgebieten) die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses. Nach einem Abgang kann die Disposition durch Ausräumung des Materials vorübergehend sinken, steigt jedoch bei erneuter Akkumulation wieder an.

Hauptauslöser sind vorrangig (konvektive oder länger andauernde advektive) Starkniederschläge, häufig in Kombination mit rascher Schnee- oder Eisschmelze (Kaitna et al., 2020). Eine erhöhte Vorfeuchte im Untergrund reduziert dabei die für eine Ereignisauslösung notwendige Niederschlagsintensität (Moser et al., 2016). Dabei wird im Anrissgebiet (z. B. durch Hangrutschungen oder Gerinnedestabilisation) das Untergrundmaterial mobilisiert und den Reliefformen folgend hangabwärts transportiert, wobei weiteres Material im Prozesspfad aufgenommen wird. Der Prozessverlauf ist typischerweise linienförmig, wobei sich im Transitbereich rinnenartige Vertiefungen mit seitlichen, längsverlaufenden Schuttwällen (Levées) ausbilden. Aufgrund der konkaven Geländeformen und dem Vorhandensein mehrerer Dispositionselemente (z.B. Durchfeuchtung, Lockermaterial) findet ein Großteil der Ereignisse in bereits bestehenden Rinnen (z.B. von Wildbächen) statt. Dieser Ausprägung verdankt der Prozess die Bezeichnung als Gerinnemure. Im Auslauf- bzw. Ablagerungsbereich entsteht meist ein flächiger Murfächer bzw. -kegel.

Gerinnemuren können durch das Zusammenwirken mehrerer förderlicher Bedingungen ausgelöst oder intensiviert werden. Solche Rahmenbedingungen werden nach Gertsch (2009) als Negativfaktoren (Abb. G-3) beschrieben.

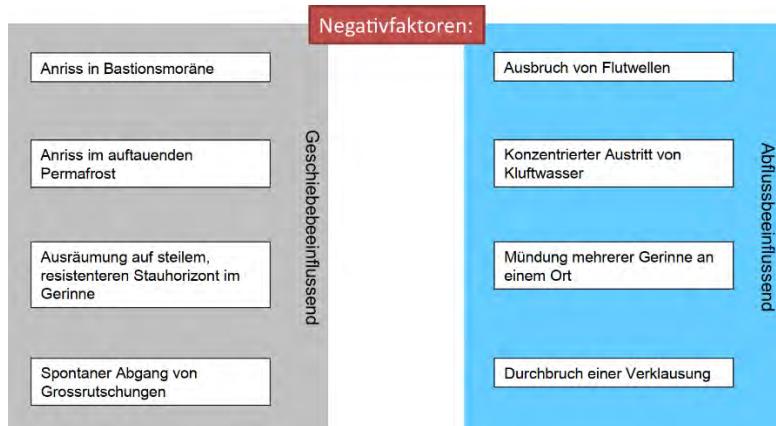


Abb. G-3: Geschiebe- und abflussbeeinflussende Negativfaktoren (verändert nach Gertsch, 2009: 73).

Aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeit und Materialdichte besitzen Gerinnemuren ein erhebliches Schadenspotential, das insbesondere im Hinblick auf das bevorzugte Prozessvorkommen in den Hoch- und Mittellagen die Wanderinfrastruktur gefährden kann. Großereignisse oder Anbrüche in niedrigeren Gefilden reichen bisweilen auch bis in die Tallagen.

Rutschungen und Hangmuren

Bewegen sich Teile des Untergrunds wie Lockermaterial, Vegetationsbedeckung und/oder Bodenmaterial flächig hangabwärts, handelt es sich um (Lockergesteins-)Rutschungen oder Hangmuren. Der Prozessverlauf und dessen Auswirkungen sind dabei, insbesondere in der Anfangsphase, identisch und Mischformen sind üblich, weshalb diese beiden Phänomene im vorliegenden Projekt zusammengefasst werden. Ihr Hauptunterschied liegt im Vorhandensein einer klar definierten Gleit- oder Rotationsfläche bei Rutschungen und einem erhöhten Wassergehalt mit damit verbundenen höheren Geschwindigkeiten (bis zu 10 m/s) bei Hangmuren. Dabei lösen sich in mittlerem bis steilem Gelände (größere) zusammenhängende Materialpakete entlang einer Anrisslinie, das Relief kann dabei von konkaven über gerade (gestreckte) bis zu konvexen Formen variieren. Bei beiden Phänomenen sind kritisch erhöhte Wasservorkommen (z.B. infolge eines Starkregenereignisses) als Auslöser auszumachen: Die Erhöhung des Porenwasserdruckes oder das Aufquellen von Tonmineralen führen zu einem Versagen in einem meist aus Scherbrüchen vorbelasteten Gebiet. Im Speziellen wird zwischen Rotationsrutschungen mit einer kreisförmigen Gleitfläche in meist tonigen oder siltigen Bodenschichten und Translationsrutschungen, welche aus dem Versagen von untergründigen Schwächezonen wie Schicht-, Kluft- oder Schieferungsflächen resultieren, unterschieden. Im Prozessschema des Projekts werden ebenfalls flachgründige Abtragungsprozesse (Blaiken) berücksichtigt (vgl. Wiegand & Geitner, 2010), um die variablen Einwirkungen auf die Wanderinfrastruktur möglichst umfassend abzudecken. Bei Eintritt einer dieser Prozesse in ein Gerinne kann sich dieser als Gerinnemure fortsetzen oder zumindest die Disposition für ein solches Ereignis erhöhen (Bast et al., 2020; Glade et al., 2020; Rickenmann, 2014).

Die Klassifizierung von Rutschungen erfolgt in Abhängigkeit des Versagensmechanismus (Gleiten oder Rotieren) sowie der Tiefe der Gleitfläche, wobei oberflächennahe oder flachgründige Rutschungen eine Gleitflächentiefe von bis zu 2 m aufweisen, mittelgründige Rutschungen eine Tiefe von 2 bis 10 m und tiefgründige Rutschungen eine Gleitflächentiefe ab 10 m. Die Prozessgeschwindigkeit kann von sehr langsam (mehrere cm/Jahr) bis sehr schnell (> 5 m/s) variieren, wobei sich die Prozesse spontan oder über einen längeren Zeitraum hinweg progressiv entwickeln können (Glade et al., 2020). Je nach bewegtem Volumen und dessen Geschwindigkeit verändern sich auch die Auswirkungen auf die Umgebung. Insbesondere schnelle, spontan auftretende Rutschungen oder Hangmuren stellen für die Wanderinfrastruktur eine Gefahr dar, indem Wegabschnitte flächenhaft weggerissen oder überfahren werden können. Nicht zu unterschätzen sind zudem Anbrüche in steilem Gelände, die bisweilen das Passieren dieser Stellen mit einem erhöhten Absturzrisiko einhergehen lassen oder verunmöglichen.

G-5.2.2 Fluviatile Prozesse

Hydrologisch-fluviatile Prozesse treten im Hochgebirge besonders intensiv und mit hohen Dynamiken auf. Die Gründe hierfür liegen in den dort vorkommenden meteorologischen Bedingungen aber auch in den topographisch-geomorphologischen Verhältnissen. So ist die Niederschlagsmenge in den Hochlagen aufgrund von Konvektionsprozessen generell erhöht. Steile Hänge, kanalisierte Geländeformen und Untergründe mit teils hohem Abflussbeiwert – also einem hohen Anteil oberflächlich abfließenden Niederschlags – begünstigen wiederum sich schnell entwickelnde und fließende (fluviatile) Sturzfluten in Gerinnen und Wildbächen.

Diese können im Hochgebirgsraum große Wassermengen mit hoher Geschwindigkeit transportieren und dabei erhebliche Mengen an Geschiebe mobilisieren. Es kommt zu intensiven Erosionsprozessen, insbesondere in Form von Sohlerosion, Uferabtrag und Umlagerung des Flussbetts.

Zudem können sich Effekte überlagern und den Abflussprozess verstärken, wie etwa bei einem Starkregenereignis, das während einer Periode intensiver Schnee- und Gletscherschmelze abläuft. Solche Ereignisse führen nicht selten zu starken morphologischen Veränderungen im Gewässerbett, Überschwemmungen und Infrastrukturbeeinträchtigungen. Brücken können beschädigt oder zerstört, Gerinnequerungen temporär oder dauerhaft unpassierbar werden. Solche Hochwasserereignisse können ihrerseits als Auslöser von Murgängen fungieren oder durch den Materialtransport deren Disposition begünstigen (Achleitner et al., 2020; Blöschl, 2020). Erosionsprozesse entlang der Uferzonen können zu Rutschungen an Böschungsflanken führen und in der Nähe befindliche Wanderwege gefährden oder zerstören.

G-5.3 Klimawandel in den österreichischen Alpen

Die Erde befindet sich in einer Phase anomal rapider Erwärmung, deren Ursache hauptsächlich im menschlichen Wirken liegt. Gebirgsregionen gelten dabei im globalen Vergleich als besonders sensitiv gegenüber klimatischen Veränderungen (IPCC 2023). Die Auswirkungen der Klimaerwärmung sind schon seit mehreren Jahrzehnten deutlich messbar, haben gerade aber in jüngster Vergangenheit wiederholt neue Rekordwerte erreicht.

Zukünftige klimatische Entwicklungen werden auf Basis verschiedener Szenarien modelliert, die unter anderem sozioökonomische, demographische und geopolitische Faktoren berücksichtigen. Diese reichen von einem optimistischen Pfad im Sinne des Pariser Klimaschutzabkommens (RCP2.6 / 'Pariser-Ziel') bis zu einem Worst-Case-Szenario ohne Klimaschutzmaßnahmen (RCP8.5 / 'Business-As-Usual'). Das tatsächliche Klima der Zukunft wird sich, abhängig vom Umfang globaler anthropogener Emissionen, innerhalb dieses Spektrums weiterentwickeln (APCC, 2025).

Aufgrund der Trägheit des Klimasystems, der langen Verweildauer von Treibhausgasen in der Atmosphäre sowie des schleppenden Fortschritts globaler Klimaschutzmaßnahmen (etwa in den sozio-technischen Systemen) wird bis etwa 2050 eine weitgehend szenarienunabhängige Entwicklung erwartet (APCC, 2025; Olefs et al., 2021). Langfristig ist mit einer zeitlichen Verschiebung der Jahreszeiten infolge veränderter Wetterlagen nach hinten zu rechnen (Gobiet et al., 2014). Insgesamt verändern sich zahlreiche meteorologische Parameter, die in komplexen Wechselwirkungen stehen und maßgeblich das Auftreten und die Intensität von Naturgefahren beeinflussen.

Temperaturanstieg

Der globale Temperaturanstieg gilt als der verlässlichste und am besten erforschte Klimaparameter. Auch in Österreich ist er deutlich messbar und bereits im Alltag spürbar (APCC, 2025). In den vergangenen 25 Jahren hat sich die mittlere Jahrestemperatur österreichweit signifikant um +1,0 °C auf rund 7,0 °C erhöht. Dabei treten sowohl regionale als auch saisonale Unterschiede auf (Abb. G-4) (Chimani et al., 2016). Gerade in der jüngeren Vergangenheit wurden mehrere Temperaturrekorde verzeichnet: Die Jahre 2023 und 2018 zählen zu den wärmsten seit Beginn der instrumentellen Messungen – sowohl in Österreich als auch weltweit (CCCA, 2024).

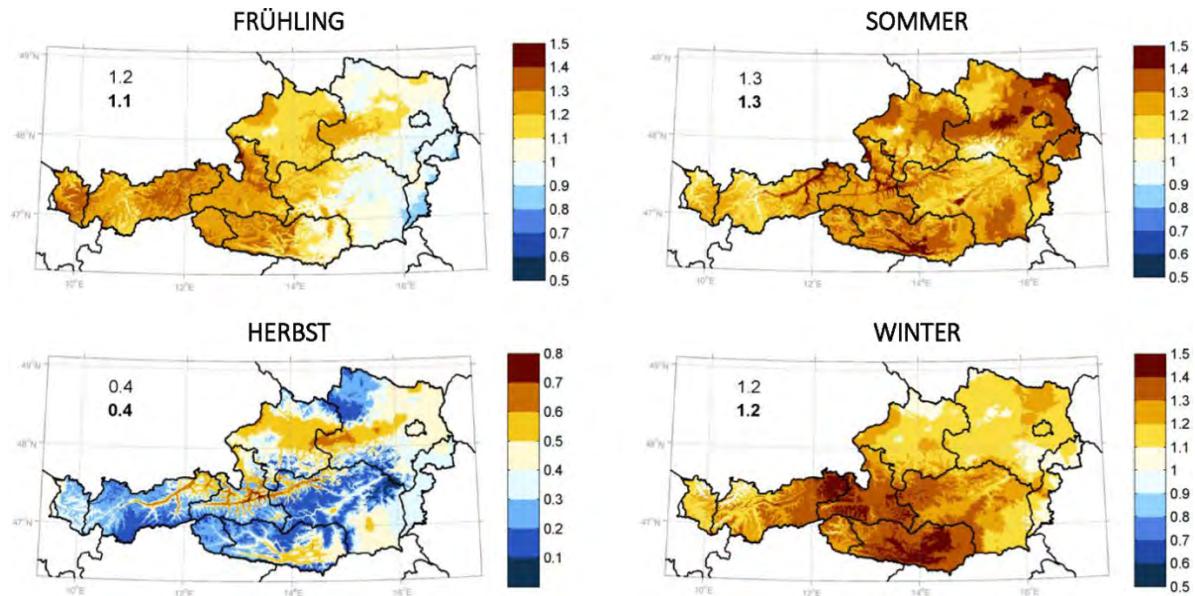


Abb. G-4: Änderungen der saisonalen Mitteltemperatur [°C] in Österreich im Zeitraum 1986-2010. Zu erkennen sind deutliche räumliche wie saisonale Variabilitäten und Abhängigkeiten von Höhenlage und Landschaftsformen (Chimani et al., 2016).

Für das kommende Quartal des 21. Jahrhunderts wird in Österreich szenarienübergreifend von einem mittleren Temperaturanstieg zwischen +1,3 °C und +2,2 °C ausgegangen (Olefs et al., 2021). In der zweiten Jahrhunderthälfte wird die weitere Entwicklung stark von der künftig emittierten Menge an Treibhausgasen abhängen (Abb. G-5). Im Ensemblemedian reicht dabei die prognostizierte Erwärmung von +1,0 °C im optimistischen Szenario (RCP2.6) bis zu +4,0 °C im Worst-Case-Szenario (RCP8.5) (Olefs et al., 2021).

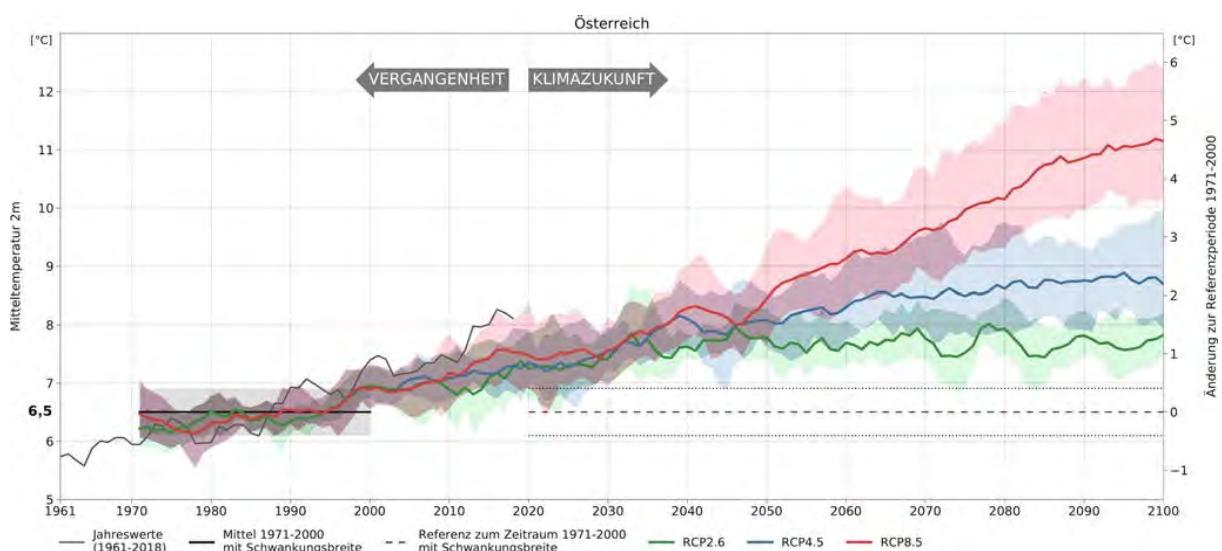


Abb. G-5: Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Österreich mit gemessenen Werten für den Zeitraum 1961 bis 2018 sowie Projektionen bis 2100 auf Basis der IPCC-Szenarien (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5). Deutlich zu erkennen ist der stetige Temperaturanstieg ab ca. 1980 bis in die nahe Zukunft und die szenarienabhängigen Differenzen ab ca. 2050, wobei sich die Erwärmungsrate im Falle des RCP8.5-Szenarios nochmals stark beschleunigen kann (Olefs et al., 2021; aktualisiert nach Chimani et al., 2016).

Die Temperaturänderungen erfahren zudem eine Verstärkung mit zunehmender Seehöhe, insbesondere während des Sommerhalbjahrs (Abb. G-6). Dieser Effekt ist vor allem auf intensivere Strahlungswerte und eine direktere atmosphärische Beeinflussung des Reliefs in den Hochlagen zurückzuführen (Kotlarski et al., 2023; Gobiet et al., 2014).

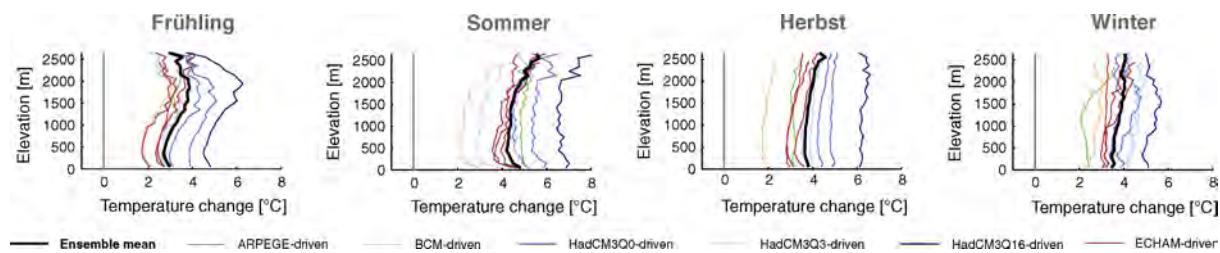


Abb. G-6: Prognostizierter Verlauf der jahreszeitlichen Änderung der Temperatur [$^{\circ}\text{C}$] in Relation zur Höhenlage in den Alpen für die Jahre 2070–2099 im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990 (verändert nach Gobiet et al., 2014).

Im Zusammenhang mit den veränderten Temperaturwerten stehen auch Auswirkungen auf die Anzahl der erosionsbeeinflussenden Frost-Tau-Wechseltage, die in Höhenlagen über 1.500 m ü. A. um etwa +10 Tage zu- und in tieferen Lagen um rund –12 Tage abnimmt (Chimani et al., 2016). Auch die Häufigkeit von Sommertagen ($T_{\text{max}} \geq 25^{\circ}\text{C}$) und Hitzetagen ($T_{\text{max}} \geq 30^{\circ}\text{C}$) steigt, was tendenziell zu einer verstärkten Nutzung der alpinen Infrastruktur beiträgt (Hohenwallner et al., 2018). Gleichzeitig verändern sich die Schmelzraten in glazialen, periglazialen und nivalen Systemen.

Niederschlagsausprägungen

In den vergangenen drei Dekaden ist die jährliche Niederschlagsmenge in Österreich leicht angestiegen (Chimani et al., 2016). Dabei sind signifikante regionale Unterschiede zu beobachten (Abb.G-7). Nicht erfasst werden kleinräumige ($< 10 \text{ km}^2$) Niederschläge, bei welchen es sich oftmals um (intensive und gerade in Gebirgsräumen häufig vorkommende) konvektive Regenfälle handelt. Die tatsächlichen Niederschlagsparameter weichen daher in der Realität von den dargestellten Werten leicht ab.

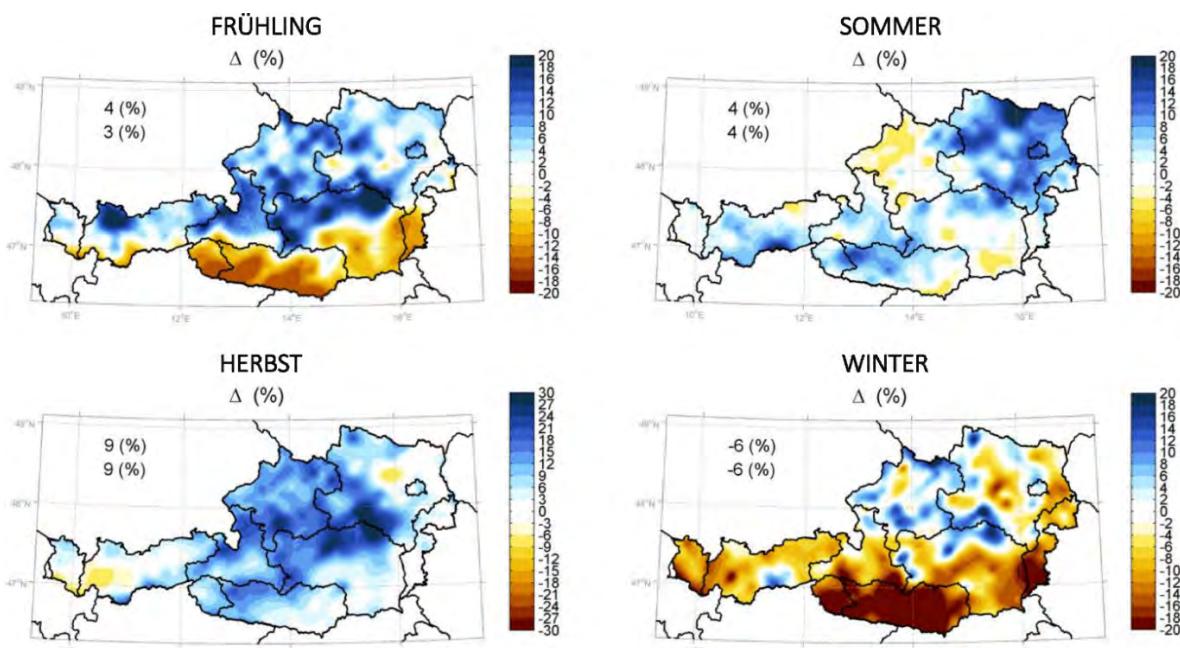


Abb. G-7: Änderungen der saisonalen Niederschlagssumme [%] in Österreich im Zeitraum 1986–2010 ohne kleinräumige ($< 10 \text{ km}^2$) Niederschläge. Die räumlichen und saisonalen Unterschiede sind markant (Chimani et al., 2016).

Die zukünftigen Entwicklungen der Niederschlagsverteilung und -intensität zu prognostizieren, gestaltet sich aufgrund mehrerer Faktoren als schwierig. Dazu zählen etwa die generell komplexen meteorologischen Dynamiken im Gebirge, die ausgeprägten (klein-)räumlichen und zeitlichen Variabilität sowie die damit verbundenen Herausforderungen für die Modellierung. Hinzu kommt die Lage des Alpenraums im Übergangsbereich zweier Zonen mit entgegengesetzten Trends: steigende Niederschläge nördlich, abnehmende südlich der Alpen (APCC, 2025).

Trotz dieser Unsicherheiten wird langfristig ein langsamer Anstieg der jährlichen Niederschlagsmenge angenommen. Für das Ende des Jahrhunderts prognostizieren Modelle unter dem Szenario RCP8.5 insbesondere entlang des Alpenhauptkamms einen Zuwachs von etwa +8,7 % (Chimani et al., 2016). Die Sommermonate, in denen bisher der größte Anteil des Jahresniederschlags zu verzeichnen war, werden jedoch signifikant trockener. Das Regenregime und der Charakter der einzelnen Niederschlagsereignisse werden sich im Jahresverlauf signifikant ändern (Abb. G-8). Beispielsweise werden sich die Intensitäten täglicher Niederschlagsereignisse ganzjährlich erhöhen (Kotlarski et al., 2023).

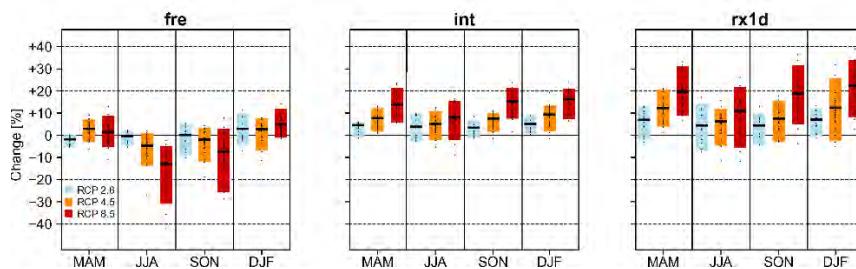


Abb. G-8: Saisonale Veränderung der Niederschlagseigenschaften [%] zwischen 1981–2010 und 2070–2099 in den nordöstlichen Alpen für die drei Emissionsszenarien RCP2.6 (blau), RCP4.5 (orange) und RCP8.5 (rot). V.l.n.r.: Häufigkeit von Regentagen (fre), Intensität von Regentagen (int) und durchschnittliche maximale tägliche Niederschlagsmenge pro Saison (rx1d) (verändert nach Kotlarski et al., 2023: 75).

Bei der Interpretation zukünftiger Veränderungen der Niederschlagssummen ist zu beachten, dass sich diese voraussichtlich auf eine geringere Anzahl an Einzelereignissen verteilen werden. Dies impliziert einerseits eine Zunahme intensiver Starkniederschläge mit kürzeren Wiederkehrintervallen, die die Prozessdynamik in alpinen Räumen signifikant beeinflussen (Pistotnik et al., 2020). Andererseits ist mit längeren Trockenperioden zu rechnen, die in Kombination mit erhöhten Temperaturen das Risiko von Dürren und damit verbundenen gesellschaftlichen Auswirkungen erhöhen (Schöner & Haslinger, 2020).

Auch die Höhenlage wird zukünftige Niederschlagsveränderungen wesentlich mitbestimmen. In hochgelegenen Regionen ist während der Sommermonate mit einer deutlich verringerten Niederschlagsreduktion zu rechnen als in den Tallagen, während in den Wintermonaten das Gegenteil der Fall sein wird (Kotlarski et al., 2023; Gobiet et al., 2014).

Extremereignisse

Als Extremereignisse werden solche Ereignisse verstanden, die aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften bzw. Dimensionen oder ihrer Auswirkungen auf die Gesellschaft als 'außergewöhnlich' gelten (Mergili & Glade, 2020). Dies ist sowohl auf klimawandelbedingte Wetterphänomene als auch auf Naturgefahrenprozesse übertragbar.

Die vorliegenden Klimaprojektionen weisen auf Veränderungen in der Häufigkeit, Dauer und Intensität extremer Wetterereignisse hin. Erwartet werden sowohl längere Zeiträume mit extremen Bedingungen als auch eine Zunahme der Intensität einzelner Ereignisse (APCC, 2025). Diese beiden Formen können sich überschneiden, in etwa wenn sich die Wiederkehrperioden extremer Niederschlagsereignisse verkürzen. Solche extremen Wetterlagen können dabei auch als Auslöser für weitere Schadensprozesse fungieren. Beispielsweise kann eine langandauernde Trockenheit zu einer hohen Waldbrandgefahr führen oder intensive Niederschläge können als Trigger-Event für Naturgefahren-großereignisse wirken.

Insbesondere bei sehr intensiven Auslöseereignissen können Naturgefahrenprozesse mit großer Magnitude und geringerer Eintretenswahrscheinlichkeit entstehen, die aufgrund ihres Ausmaßes und Schadenspotentials ebenfalls als Extremereignisse zu klassifizieren sind. Im Zusammenspiel der sich verändernden meteorologischen und geomorphologischen Rahmenbedingungen ist davon auszugehen, dass Extremereignisse in Zukunft häufiger auftreten und auch Regionen betreffen werden, die bislang nicht gefährdet waren. Dabei ist im Mensch-Technik-Umwelt-System auch mit einer Zunahme der gesellschaftlichen Verwundbarkeit und einer Verschärfung der Folgewirkungen zu rechnen (Mergili & Glade, 2020).

Gletscherrückgang

Aufgrund erhöhter Temperatur- und Strahlungswerte und schneeärmeren Wintern schmelzen die Gletscher der Alpen mit rapiden Rückzugsraten ab. Dies wird durch den Umstand positiver Rückkopplungsprozesse (positive feedback loops) wie höheren Strahlungsleistungen und abnehmenden Albedoewerten in den entsprechenden Lagen weiter verstärkt.

Diese Tatsache wird durch die Messung jährlicher Schmelzraten auch auf dem Papier evident. Innerhalb der letzten drei Haushaltsjahre wurde in Österreich der höchste (2021/22), dritthöchste (2023/24) und vierthöchste (2022/23) Schmelzbetrag der 134-jährigen Messreihe verzeichnet. Der aktuelle mittlere Rückzugswert von 2023/24 liegt bei -24,1 m (Lieb & Kellerer-Pirklbauer, 2025).

Diesen Trend fortsetzend ist zu erwarten, dass die Gleichgewichtslinien der alpinen Gletscher in den nächsten 25 Jahren um ca. 150 m bis 350 m ansteigen werden (Gobiet et al., 2014). In der Konsequenz ist davon auszugehen, dass bis dahin ein signifikanter Anteil der gegenwärtig noch existierenden Gletscher in den österreichischen Alpen verschwunden sein wird (Lieb & Kellerer-Pirklbauer, 2025). Für die größeren Exemplare der Alpen zieht sich derselbe Prozess noch ein wenig in die Länge bzw. ist mehr von den tatsächlich eintretenden Szenarien abhängig (Beniston et al., 2018).

Die Eismassen der Gletscher stabilisieren die anliegenden Felswände. Sind die Gletscher dann nicht mehr oder nur in einer degradierten Form vorhanden, führt dies zu instabilen Felsspartien. Der Gletscherrückgang und die damit einhergehende Veränderung der Hochgebirgsmorphologie beeinflussen damit tiefreichend die Entwicklungs- und Ablaufdynamiken sämtlicher gravitativer Naturgefahrenprozesse. Die hydrologischen Phänomene werden besonders stark durch die Schmelzprozesse und der Wasserverfügbarkeit gesteuert. Zudem ist in diesen Zusammenhängen das Entstehen extremer Ereignismagnituden möglich, in etwa durch Prozesskaskaden (CCCA, 2023).

Permafrost-Degradation

Zum Permafrost der Alpen werden jene Bereiche gezählt, bei denen die Lithosphäre ganzjährig Temperaturen von 0 °C oder darunter aufweist. Ein Eisvorkommen ist dabei weder notwendig noch ausgeschlossen (u.a. Otto et al., 2020a). Auf dem Untergrund aufliegende Eismassen wie Gletscher sind demnach definitionsgemäß nicht miteingeschlossen. Anders wiederum als Blockgletscher, welche vereinfacht als vereiste und daher langsam hangabwärts kriechende Blockhalden beschrieben werden können (Nötzli & Gruber, 2005).

Die Permafrostbedingungen stehen in direktem Zusammenhang mit den lokalen Standorteigenschaften, zu denen Neigung, Exposition, Albedo, Schneedecke, Vegetation etc. zählen, sowie den meteorologisch-atmosphärischen Bedingungen (oberflächennahe Lufttemperatur, Sonnenscheindauer etc.). In Abhängigkeit der jeweiligen Standortbedingungen können sich Permafrostfelder hinsichtlich ihrer Größe und Tiefe erheblich voneinander unterscheiden. Im Falle diskontinuierlichen Auftretens von Permafrost können diese mit Nicht-Permafrost kleinräumig wechselnd auftreten. Auch im dreidimensionalen Tiefenraum weisen Gebiete mit Permafrost bisweilen eine ausgeprägte kleinräumige Heterogenität auf. So kann sich etwa 'warmer' (Temperaturen am Gefrierpunkt) und 'kalter' Permafrost im Meterbereich verändern (Gärtner-Roer & Bast, 2019). Zudem tritt in vielen Gebieten das Phänomen erst in größeren Tiefen auf, wobei die Schicht darüber (Auftauschicht / active layer) saisonalen Temperaturschwankungen ausgesetzt ist. Steile Felswände sind dafür aufgrund ihrer hohen Absorptionseigenschaften der Wärmestrahlung und geringen Schneeauflagen besonders anfällig (Mamot et al., 2021).

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass in den Alpen in nordexponierten Lagen ab einem Höhengradienten von ca. 2.500 m.ü.A. günstige Verhältnisse für Permafrost herrschen. In Südlagen ist aufgrund der höheren Sonneneinstrahlung und geringeren Schneeauflagen diese Schwelle bei ca. 3.000 m.ü.A. gelegen. Aufgrund mikroklimatischer Gunstlagen können aber auch vereinzelt bedeutend tiefer liegende Permafrostfelder ausgemacht werden (Nötzli & Gruber, 2005).

Der Flächenanteil des modellierten Permafrostvorkommens in Österreich liegt bei rund 1 %. Die tiefstgelegenen Regionen sind dabei in schattigen Nordlagen auf ca. 2.000 m.ü.A. (und vereinzelt darunter) vorzufinden, das Hauptaufkommen tritt in Höhenlagen ab ca. 2.600 m.ü.A. auf (Otto et al., 2020b).

Permafrost weist im Allgemeinen eine stabilisierende Wirkung auf das umgebende Material auf. Dieser Effekt beruht im Grunde auf Versiegelung (in Form von Spalteneis) und Festfrieren. Wärmere Permafrostsichten weisen jedoch verminderte Stabilitätswerte auf (Bast et al., 2020; Krautblatter et al., 2013), was insbesondere bei schnell eintretenden Temperaturveränderungen zu Versagensmechanismen in der direkten Umgebung führen kann. Weil der Zustand des Permafrosts im jährlichen Verlauf stark divergiert, ist ein Auftreten zeitlich begrenzter, für Sturzprozesse günstiger Zeiträume zu beobachten, welche verstärkt in den Sommermonaten auftreten (Zischg et al., 2012).

Die Messreihen der Alpen sind zwar noch nicht sehr umfangreich, dennoch zeichnen sich für die vergangene Dekade höhere Erwärmungsraten als gewöhnlich ab. Damit betrifft die Erwärmung auch nach und nach tiefer im Untergrund gelegene Permafrostvorkommen (Nötzli et al., 2024).

Insgesamt führen diese Veränderungen bereits jetzt zu einer höheren Disposition vieler Naturgefahrenereignisse im Gebirgsraum, was deren Auftreten insbesondere in den Übergangszonen verstärken lässt. In aktuell besonders 'aktiven' Permafrostbereichen wird im Laufe der Zeit der Permafrost langfristig schwinden, was mit einer weiteren Intensivierungswelle dann langsam in eine Stabilisierung des Untergrunds mit abnehmenden Prozessraten übergehen wird (Bast et al., 2020).

G-5.3.1 Auswirkungen auf die alpinen Naturgefahren

Die genannten meteorologischen und geomorphologischen Rahmenbedingungen beeinflussen die Disposition sowie das räumliche und zeitliche Auftreten, die Magnitude und den Ablauf von Naturgefahrenprozessen. Die beobachteten und prognostizierten Veränderungen in der Prozessdynamik resultieren dabei aus dem komplexen Zusammenspiel einer Vielzahl von Faktoren. Entsprechend sind Prognosen nur in verallgemeinerter Form und auf großmaßstäblicher Ebene möglich.

Im Gebirge sind die Gebietseigenschaften generell sehr stark von kleinräumig vorherrschenden Bedingungen, wie beispielsweise Mikroklimata, geologischen Störzonen oder lokaler Morphologie, abhängig. Daher ist bei der Interpretation der folgenden Aussagen stets eine lokale bzw. regionale Unschärfe zu berücksichtigen. Der zentrale Befund dieser Prognosen ist, dass sich nicht nur die Umwelteinflüsse verändern, sondern auch die Naturgefahrenprozesse selbst einer Verschiebung unterliegen (Abb. G-9). Diese zukünftigen Veränderungen sollten bei der Betrachtung von Naturgefahren mit derselben Priorität berücksichtigt werden wie gegenwärtig beobachtbare Prozessmerkmale.



Abb. G-9: Prognostizierte Veränderungen ausgewählter Naturgefahren für Österreich. Rote Pfeile bedeuten eine steigende, gelbe Pfeile eine konstante und blaue Pfeile eine sinkende Gefahrenaktivität und -intensität. Sofern mehr als ein Pfeil angezeigt wird, deutet dies auf einen nichtkonsistenten Trend hin, beispielsweise aufgrund von Höhen-, Regionen- oder Saisonabhängigkeiten (verändert nach APCC, 2025: 61)

Gravitative Sturzprozesse

Im Zuge der globalen Klimaerwärmung ist in Hochgebirgsräumen bereits gegenwärtig eine Zunahme der Frequenz und Magnitude gravitativer Sturzprozesse zu beobachten – eine Entwicklung, die sich mit fortschreitendem Klimawandel voraussichtlich weiter verstärken wird (u. a. Jacquemart et al., 2024; Günzel & Haeberli, 2020; Stoffel & Huggel, 2012). Hauptursachen hierfür sind die Degradation des Permafrosts in höheren Lagen sowie der Rückzug von Gletschern, wodurch vormals stabilisierte Hangbereiche destabilisiert werden (u. a. Stoffel et al., 2024; Savi et al., 2021; Krautblatter et al., 2013).

Weitere klimatisch bedingte Einflussfaktoren, etwa häufigere Frostwechsel und intensivere Niederschlagsereignisse, verstärken diese Entwicklung zusätzlich (Glade, 2020). Besonders sensibel für derartige Veränderungen sind alpine und hochalpine Räume (Gobiet et al., 2014). In der Folge verlagern sich primäre Prozessgebiete zunehmend in höhere Lagen, während die Prozessaktivität in tieferen Bereichen tendenziell abnimmt (Deline et al., 2011). Gleichzeitig verschiebt sich die Hauptaktivität vom Frühling in die Sommermonate (Preh et al., 2020). Ein Umstand, der insbesondere im Kontext menschlicher Nutzungsmuster, etwa im alpinen Tourismus, ein Problem darstellt.

Gerinnemuren

Das Auftreten von Murgängen wird sich infolge des Klimawandels sowohl räumlich als auch zeitlich ausweiten. Künftig ist vermehrt mit Abgängen bis in höhere Gebirgslagen sowie mit einem verlängerten Zeitraum von März bis Dezember zu rechnen (Kaitna et al., 2020; Stoffel et al., 2014). Ursache hierfür ist eine veränderte Disposition, die durch klimabedingte Prozessveränderungen beeinflusst wird: Durch die verstärkte Schmelze von Schnee, Gletschern und Permafrost wird mehr durchfeuchtes Lockermaterial mobilisierbar, wodurch die Wirkung intensiver Starkniederschläge zusätzlich verstärkt wird. Gleichzeitig erhöht sich infolge intensivierter gravitativer Sturzprozesse die Verfügbarkeit von Jungschutt sowie die Geschiebefracht in alpinen Gerinnen. Im Zusammenhang mit der Degradation von Permafrost können zudem neue Großereignisse entstehen, etwa durch Anbrüche an den Stirnfronten von Blockgletschern.

Während im Sommer infolge rückläufiger Niederschlagsmengen mit einer Abnahme der Ereignisfrequenz zu rechnen ist, steigen die Prozesswahrscheinlichkeiten in den Übergangs-jahreszeiten. Diese werden voraussichtlich feuchter und Schmelzprozesse setzen früher ein. Beides sind Faktoren, die zu einer erhöhten Muraktivität in Frühling und Herbst beitragen (Gobiet et al., 2014; Jacquemart et al., 2024; Kaitna et al., 2020).

Rutschungen und Hangmuren

Rutschungen und Hangmuren werden vor allem durch Wassereintrag und Bodensättigung beeinflusst. Ihre zukünftige Entwicklung ist daher eng mit den Veränderungen hydro-meteorologischer Bedingungen verknüpft (vgl. Kap. G-5.3). In Perioden mit hohen Niederschlagsmengen ist von einer Zunahme der Ereignishäufigkeit auszugehen (Bast et al., 2020; Stoffel et al., 2014).

Gleichzeitig sind die Sommermonate künftig durch längere Trockenphasen und punktuell intensivere Regenfälle geprägt. Diese Veränderung wirkt sich sowohl auf die oberflächennahe Bodenerosion (Strauss & Schmaltz, 2020) als auch auf das generelle Materialgefüge im Untergrund aus. In der Folge kann sich die variable Disposition für Rutschungen und Hangmuren erhöhen (Crozier, 2010).

Fluviatile Prozesse

Für die Sommermonate wird trotz generell trockenerer Bedingungen eine Zunahme intensiver Hochwasserereignisse mit erhöhten Abflussspitzen erwartet. Verantwortlich dafür sind vor allem Veränderungen im Abflussregime und in den Abflussmengen alpiner Wildbäche. Diese resultieren einerseits aus steigenden Schmelzraten in nivalen und (peri-)glazialen Systemen, andererseits aus der Zunahme extremer Starkniederschläge (Beniston et al., 2011; Glade, 2020).

Mit dem Rückzug der Gletscher können zudem neue Gletscherseen entstehen, während sich bestehende weiter auffüllen. Diese Seen bergen ein zunehmendes Risiko für Sturzfluten (Glacier Lake Outburst Floods, GLOF). Solche Ereignisse können durch Dammbrüche infolge von Permafrostauftau ausgelöst werden oder durch Prozesskaskaden entstehen, etwa wenn eine großvolumige Massenbewegung in den See stürzt (Frey & Haeberli, 2020; Hähnen et al., 2016).

G-5.3.2 Auswirkungen auf das alpine Wegenetz

Das alpine Wegesystem befindet sich im direkten Wirkungsbereich der Naturgefahrenphänomene. Weil diese durch die Klimaerwärmung hochgradig beeinflusst werden und sich in ihrem Auftreten und ihren Intensitäten verändern, ist diese Infrastruktur in direkter Konsequenz von einer erhöhten Gefährdungslage betroffen. Einige der Ursachen sind in der Abbildung G-10 beschrieben.

Die Implikationen für das Wegesystem können sich in Veränderungen des Charakters und der Schwierigkeit einzelner Wege und Routen äußern. Diese Entwicklung verändert in der Folge die Attraktivität des Wegeabschnittes und wirkt sich damit auf das Nutzungsverhalten sowie letztlich auf die Nutzergruppen aus (Braun, 2009).

Durch die Schäden an den Wegen erhöhen sich auch die Kosten und der Erhaltungsaufwand derselben (vgl. CCCA, 2024). Extremereignisse oder sich stark intensivierende Ereigniszonen können eine Wegsperrung oder -verlegung nach sich ziehen.

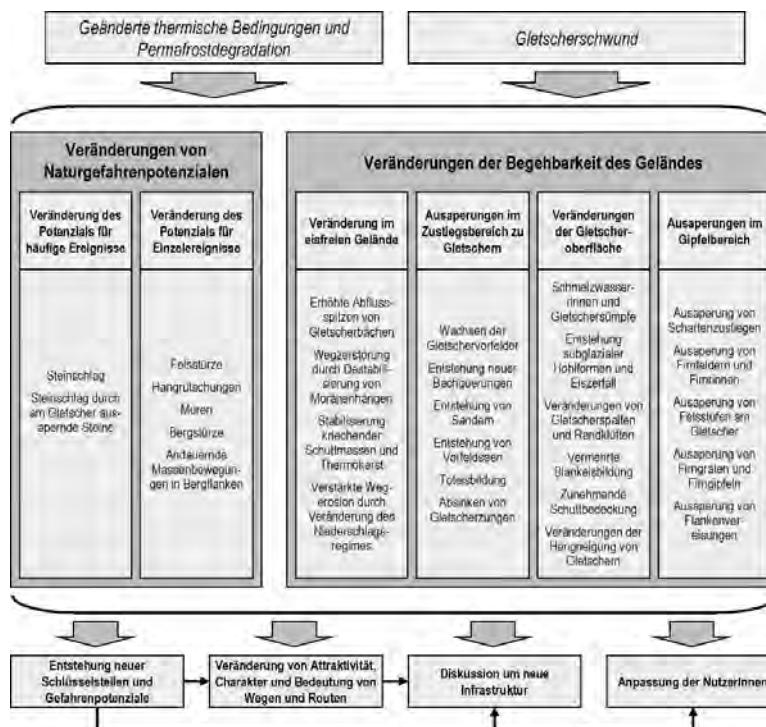


Abb. G-10: Auswirkungen klimawandelbeeinflusster Naturphänomene im Hochgebirge auf das dortige Routen- und Wegenetz (Braun, 2009: 36).

Parallel dazu wird von steigenden touristischen und freizeitlichen Aktivitäten in den Bergen ausgegangen. Bereits jetzt ist ein Trend hinsichtlich mehr Wandernden erkennbar (Pröbstl-Haider et al., 2021). Zukünftige Hitzeprobleme in den Städten ('Stadt-/Hitzevlucht') wird als Push-Faktor für viele Menschen dazu beitragen, Erholung in kühleren Gebirgs- und Hochlagen zu suchen (Hinderling et al., 2021a). Als Pull-Faktoren werden generell günstigere meteorologische Bedingungen wie in etwa die Zunahme der Tage sogenannten 'Wanderwetters' (max. Tagestemperatur in 1500 m.ü.A. $\geq 15^{\circ}\text{C}$ an zumindest 3, 5 oder 7 zusammenhängenden Tagen; Prettenthaler & Formayer, 2011) (APCC, 2025) wirken.

Eine erhöhte Frequentierung von Wander- und Bergwegen resultiert in einer verstärkten Abnutzung der Wege, was wiederum die zuvor beschriebene Problematik der Wegeerhaltung verstärkt. Die Zunahme der Anzahl der Wandernden geht mit einer erhöhten Exposition gegenüber den Naturgefahrenphänomenen einher, was die Wahrscheinlichkeit für Schadensereignisse steigert. Die Notwendigkeit eines Diskurses mit den Nutzer:innen ist somit offensichtlich. Unter Einbeziehung der relevanten Akteur:innen sollen Schäden minimiert und langfristig wirksame Anpassungsstrategien gefunden werden (Salim et al., 2021; Braun, 2009).

G-6 Pilotregion

Um die österreichischen Alpen in ihrer Charakteristik einzufassen, wurde eine möglichst repräsentative Pilotregion gesucht. Die Wahl fiel dabei auf die zentralen Stubaier Alpen (Tirol), konkret die hinteren Talbereiche des Oberberg-, Lüsener- und Fotschertals. Ein wesentlicher Grund hierfür sind die günstigen topographischen Voraussetzungen: Der ausgeprägte Höhengradient (bis 3.123 m ü. A.) bildet ein breites Spektrum der alpinen Klimabedingungen und Naturprozesse, insbesondere mit Blick auf zukünftige Entwicklungen, ab. Hinzu kommt eine dichte alpine Wegeinfrastruktur in allen Schwierigkeitsklassen sowie eine vielschichtige Datengrundlage. Das Untersuchungsgebiet umfasst eine Fläche von insgesamt 44,5 km² (Abb. G-11).

Geologisch betrachtet ist das Gebiet dem Ötztal-Stubai-Kristallin zuzuordnen. Das Gesteinsvorkommen besteht aus polymetamorphen kristallinen Gneisen, Amphiboliten und Schiefern sowie deren Variationen (Geologische Bundesanstalt, 2011). Seit dem Quartär wurde das Gebiet mehrmals glazial überprägt, auf dessen Morphostruktur treten heute je nach Reliefhöhe und Topographie verschiedene geomorphologische Prozesse dominant auf: denudative, glaziale und periglazial-gravitative sowie sämtliche Formen gravitativer Massenbewegungen und fluvialer Prozesse.

Es befinden sich zwei Gletscher (Lüsener Ferner, Bergglasferner) innerhalb des Untersuchungsgebiets (Flächenanteil: 2,1 %). Die perennierenden Gerinne im Gebiet weisen aufgrund der vergletscherten Kare an den südlichen und westlichen Talschlüssen ein (nivo-)glazial geprägtes Abflussregime auf. Laut Otto et al. (2020b) ist bei 25,3 % der Fläche mit einem Permafrostvorkommen zu rechnen. Es sind zudem mehrere Blockgletscher in aktivem, inaktivem oder fossilem Zustand dokumentiert.

Zwischen der Waldgrenze (~2.000 m ü. A.) und der vegetationsfreien Zone (>2.900 m ü. A.) kommen hauptsächlich alpine Bürstlings- und Heidegrasflächen, Krummholtzbestände, Zwergräucher vor, darunter sind alpine Nadelwälder dominant. Der Großteil der Wanderwege im untersuchten Bereich liegt oberhalb der bewaldeten Zonen und ist damit besonders sensiv gegenüber klimatisch und geomorphologisch bedingten Naturgefahrenprozessen.

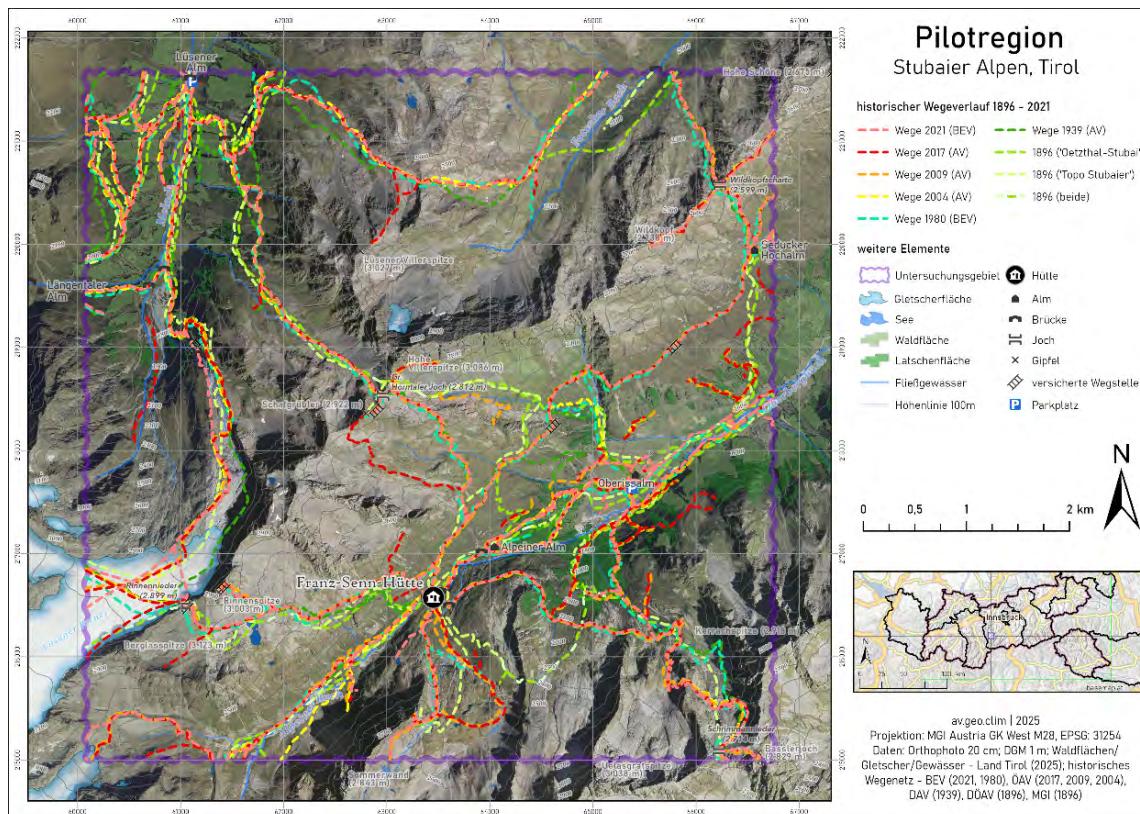


Abb. G-11: Übersicht der Pilotregion und historische Entwicklung des Wegenetzes. Im zeitlichen Verlauf sind kleinere Abweichungen und zum Teil markante neue (markierte) Wegverläufe zu erkennen.

G-7 Methoden

Angesichts der aktuellen Entwicklungen, welche im Zusammenhang mit soziologischen und insbesondere mit den klimatischen Veränderungen auf das Wanderwegenesystem einwirken, ist eine mehrdimensionale Problemlage (vgl. Kap. G-3) zu erkennen. In Anbetracht der formulierten Zielsetzungen hinsichtlich der Wegeinstandhaltung und der Reduzierung von Gefahren für Wandernde (Kap. G-4) erscheint eine integrierte, methodisch fundierte Herangehensweise als zielführend.

Die Projektmethode verfolgt demnach zwei übergeordnete Ziele: Einerseits soll ein Datensatz geschaffen, aufbereitet und lösungsorientiert verwertet werden, andererseits ist ein multimedialer Wissenstransfer vorgesehen, der die Resultate kommuniziert und perspektivisch an die unterschiedlichen Kompetenzen der jeweiligen Akteursgruppen angepasst werden kann. Diese Gruppen werden im Vorfeld identifiziert und charakterisiert (Kap. G-7.1).

Die Datengrundlage für Analyse, Auswertung und bestehende Methoden wird durch den sogenannten 3F-Ansatz (Fern-, Fremd- und Felderkundung) (Kap. G-7.2) geschaffen.

Aufgrund der besonderen Situation, dass teilweise bestehende Methoden in das Projektkonzept eingebunden sind, unterscheidet sich der Ablauf der konzeptionellen Entwicklung von jenem des operativen Methodenworkflows (Abb. G-12). Der Entwicklungsablauf wird in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert.

Die Grundlage des datenzentrierten Methodenteils bilden bereits vorhandene, prototypische Konzepte (vgl. Landskron, 2024): Zum einen das Klassifizierungstool mit den sogenannten Bewertungspfaden (Kap. G-7.3), welche das von selektierten Naturprozessen ausgehende Gefahrenpotential für alpine Infrastruktur ermitteln können; zum anderen die Gefahrenpotentialkarten (Kap. G-7.5), die diese Ergebnisse modifizierbar darstellen können. Im Projektverlauf wurden diese Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit überprüft, weiterentwickelt und an den spezifischen Projektansatz angepasst.

Für eine reibungslose Anbindung an das Bewertungsinstrument wird ein digitaler Survey für die Datenerhebung (Kap. G-7.4) entwickelt. Nach erfolgter Auswertung der erhobenen Daten kann den Erheber:innen als zukünftige Unterstützung für ihre Tätigkeit eine informative Gefahrenpotentialkarte bereitgestellt werden.

Diese Karte wird in StoryMaps (Kap. G-7.6) integriert, die als innovatives Kommunikationsmittel dienen. Im Rahmen des Projekts werden darin sowohl projektverwandte wissenschaftliche Themen als auch wanderspezifische Inhalte akteursangepasst aufbereitet. Dies geschieht beispielhaft für Wanderneulinge und weniger erfahrenere Wander:innen, da diese Gruppe für den intendierten Wissenstransfer eine zentrale Zielgruppe darstellt.

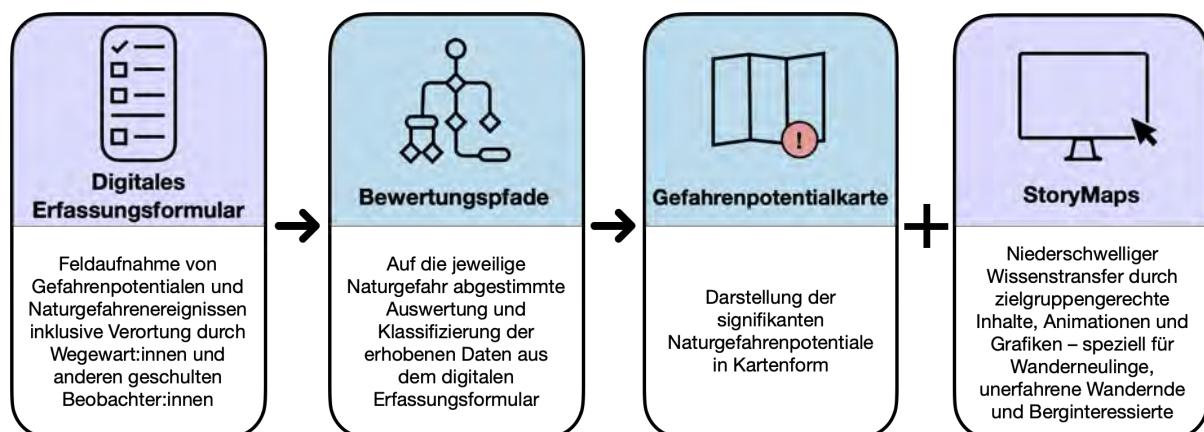


Abb. G-12: Methodischer Workflow der im Projekt entwickelten Werkzeuge: Mithilfe des digitalen Erfassungsformulars werden systematisch Daten erhoben. Diese werden durch standardisierte Bewertungspfade aufbereitet, wodurch Gefahrenpotentialkarten erstellt werden können. Die StoryMaps liefern begleitende Informationen und zielgruppenspezifische Inhalte. Blau: auf Basis von Landskron (2024) überarbeitet und erweitert; Violett: gänzlich neu konzipiert und entwickelt.

G-7.1 Analyse der Akteursgruppen

Im alpinen Raum sind unterschiedliche Akteur:innen mit jeweils variierendem Erfahrungsstand, Wissen, Interessen und Handlungsspielraum aktiv. Insbesondere der in den letzten Jahren aufgekommene Wanderboom führt dazu, dass auch zunehmend bergunferahrene Personen das alpine Wegenetz nutzen. Eine Entwicklung, die sich durch den Klimawandel weiter verstärken wird, da steigende Temperaturen im urbanen Raum eine zunehmende Verlagerung von Freizeitaktivitäten in höher gelegene, kühlere Bergregionen ('Stadt-/Hitzevlucht') begünstigen (Hinderling et al., 2021a).

Um den Wissenstransfer hinsichtlich alpiner Gefahren bedarfsoorientiert und wirkungsvoll zu gestalten können, wurde im Rahmen des Projekts eine differenzierte Einteilung der relevanten Akteur:innen in drei Gruppen vorgenommen (vgl. Abb. G-13). Diese Gliederung berücksichtigt nicht nur den vermuteten Kenntnisstand und die Fähigkeiten der jeweiligen Gruppen im Gelände, sondern auch ihre zeitlichen und räumlichen Handlungshorizonte. Durch diese Differenzierung wird es zudem möglich, den einzelnen Gruppen gezielt Aufgaben und Verantwortlichkeiten zuzuweisen. Zugleich lässt sich ihr Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit im alpinen Wegenetz effektiver gestalten und steuern.

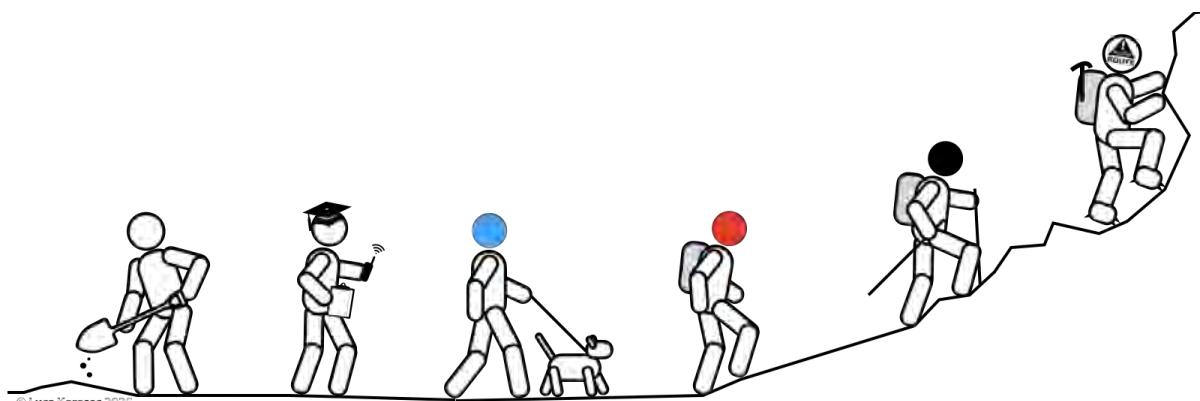


Abb. G-13: Übersicht der im Projekt av.geo.clim definierten Akteursgruppen mit unterschiedlichem Erfahrungsstand, dargestellt anhand der Farbcodierung der Wanderwegklassifizierung. V.l.n.r: Wegewart:in, Expert:in, freizeitorientierte Spaziergänger:in, geübte:r Wander:in, erfahrene:r Berggeher:in und Alpinist:in.

Freizeit- und Bergsportler:innen

Diese Gruppe wird hier primär als Nutzer:innen der alpinen Infrastruktur verstanden. Ihr zeitlicher und räumlicher Handlungshorizont bezieht sich überwiegend auf das unmittelbare 'Hier und Jetzt' während der Wanderung. Je nach Erfahrungsgrad variiert jedoch das Maß an Vorbereitung – etwa durch Tourenplanung oder der Nutzung von Wetter- und Tourenberichten – sowie das Wissen über das begangene Gebiet und das Verhalten im alpinen Raum.

Im Rahmen des Projekts agieren Freizeit- und Bergsportler:innen als Empfänger:innen von Informationen, die von den anderen Gruppen bereitgestellt werden. Aufgrund ihrer Heterogenität wird diese Gruppe exemplarisch entlang der Wegekategorien des alpinen Wegenetzes weiter ausdifferenziert:

- Freizeitorientierte **Spaziergänger:innen** mit Fokus auf leicht zugängliche, ebene Wege. Häufig in familiärem Kontext oder mit Haustieren unterwegs. Primär an Erholung und Naturerlebnis interessiert. Hier werden auch **Wanderneulinge** dazugezählt.
- Geübte **Wandernde** mit Trittsicherheit und Ausdauer. In der Lage, mittelschweres Gelände zu bewältigen.
- Erfahrene, schwindelfreie **Berggeher:innen** mit fundierter alpiner Kompetenz. Routiniert im Umgang mit anspruchsvollen Touren und variablen Bedingungen.
- **Alpinist:innen** beherrschen hochalpines Gelände, verfügen über umfangreiche Tourenerfahrung und alpine Technikkenntnisse.

Dies wird vor allem beim Wissenstransfer berücksichtigt, indem je nach Untergruppe und damit angenommenen Erfahrungshintergrund angepasst adressiert wird. Die Sensibilisierung erfolgt dabei über die digitalen StoryMaps (Kap. G-7.6 & G-9.4). So benötigt ein freizeitorientierter Spaziergänger eher niederschwellige, klar strukturierte Informationen zu Naturgefahren und klimabedingten Veränderungen, während erfahrene Alpinist:innen komplexere Zusammenhänge erfassen und einordnen können (vgl. Pröbstl-Haider et al., 2021). Ziel ist es, alle Nutzergruppen angemessen zu informieren, ohne insbesondere weniger erfahrene Personen durch eine zu hohe Komplexität abzuschrecken.

Wegewart:innen

Wegewart:innen sind vorwiegend ehrenamtlich tätige Personen, die meist über eine langjährige Zuständigkeit für ein fest definiertes Gebiet verfügen. Durch ihre kontinuierliche Tätigkeit entwickeln sie ein detailliertes, lokal verankertes Wissen über ihren Verantwortungsbereich. Ihr zeitlicher Handlungshorizont ergibt sich damit primär aus der Dauer ihres Engagements als Wegewart:in, ihr räumlicher Handlungshorizont ist auf das ihnen zugewiesene Arbeitsgebiet fokussiert. Dadurch fungieren sie als lokale Expert:innen, die ihren Handlungsräum mit all seinen Besonderheiten, Problemstellen und Gefahrenpotentialen kennen. Im Projekt werden die Wegewarte als Sender:innen von Rohinformationen verstanden. Sie liefern zentrale Daten zum Zustand der Wege, zu bestehenden oder neu entstandenen Gefahrenstellen sowie zu relevanten Veränderungen im Gelände.

Expert:innen

Diese Gruppe umfasst fachlich ausgebildete Alpinexpert:innen mit methodischer Kompetenz etwa in der 3F-Methode (Kap. G-7.2) und raumbezogenen Analysen. Ihr Wirkungsradius erstreckt sich sowohl räumlich als auch zeitlich – überregional, retrospektiv und prospektiv. Im Projekt agieren sie als Bearbeitende, indem sie eigene Informationen, mit denen der Wegewart verschneiden, selbst aufnehmen, analysieren, aufbereiten und zielgruppenspezifisch an die Freizeitnutzenden weitergeben.

G-7.2 Fern-, Fremd- und Felderkundung (3F-Methode)

Um das breite Spektrum an Informationen und Datengrundlagen abzudecken, das in den Entwicklungs-, Anwendungs-, Analyse- und Auswertungsphasen des Projekts erforderlich ist, wurde ein sogenannter 3F-Ansatz verfolgt (Fern-, Fremd- und Felderkundung). Die erhobenen und verwendeten Daten aus der Pilotregion wurden unter Einbeziehung aktueller Fachliteratur kritisch geprüft, um eine hohe Datenqualität sicherzustellen. Die Verarbeitung erfolgte mithilfe geographischer Informationssysteme (ESRI ArcGIS Pro) sowie statistischer Software (Microsoft Excel), welche auch zur Datengenerierung eingesetzt wurden.

Fernerkundung

Im Bereich der Fernerkundung kamen primär digitale Gelände- und Oberflächenmodelle (DGM/DOM) sowie multitemporale Orthophotos zum Einsatz. Auf dieser Grundlage wurde eine geomorphologische Übersichtskarte erstellt, welche charakteristische Geländeformen – etwa Murkegel, Erosionsflächen oder Schutthalden – sowie potentielle Anbruchgebiete sichtbar macht. Ergänzt durch Vegetationsanalysen und schattierte digitale Geländemodelle und Hangneigungskarten konnten erste Hotspots mit erhöhtem Gefahrenpotential identifiziert werden.

Fremderkundung

Die Fremderkundung umfasste die Auswertung bestehender Datenquellen, darunter topographische und geologische Karten, Permafrostindikatoren (PERMAKART3.0; Otto et al., 2020b) sowie Klimaprojektionen (u.a. Kotlarski et al., 2023; Olefs et al., 2021; Chimani et al., 2016). Diese dienten dazu, raumplanerische und geowissenschaftliche Grundlagen in die Gefahrenbewertung zu integrieren. Bereits verfügbare Datensätze einzelner Ereignisbereiche aus der Pilotregion (Landskron, 2024) wurden zur Ermittlung des Gefahrenpotentials herangezogen. Die Entwicklung des Wegenetzes wurde mithilfe historischer Kartenwerke (BEV, ÖAV) rekonstruiert. Historische Naturereignisse wurden über Kataster, Pressequellen und Archivrecherchen dokumentiert. Zusätzlich flossen Erkenntnisse aus Experteninterviews mit lokalen Wissensträger:innen in die Analyse ein.

Felderkundung

Die Felderhebung erfolgte durch eine systematische Begehung des Wanderwegnetzes im Untersuchungsgebiet. Dabei erfolgte eine Überprüfung der Grundlagen der Projektmethodik. Die hierbei zur Anwendung gekommenen Feldaufnahmeflätter konnten validiert, die darauf aufbauende Weiterentwicklung zu digitalen Erhebungssurvey konnte präzisiert und die Projektziele wiederum daraufhin konkretisiert werden. In Fällen unklarer Gefahrenwirkung kamen ergänzende Modellierungen zum Einsatz, um potentielle Auswirkungen auf das Wegenetz fundiert abschätzen zu können.

G-7.3 Bewertungspfade (Gefahrenpotential)

Zur Gefahr und damit zum Gegenstand der Betrachtungen werden Naturprozesse erst dann, wenn sie in einem relevanten Raum wirken und potentiell Schäden verursachen oder Menschen gefährden können. Gefahrenstellen auf Wanderwegen, die im Zusammenhang mit Naturgefahren stehen, sind damit das Produkt aus einer ungünstigen Kombination mehrerer Gefahrenfaktoren. Diese setzen sich aus den Eigenschaften des Prozessgebiets, welche die Disposition und Ereignisintensität bedingen, der unmittelbaren Wegeumgebung sowie dem Wegeverlauf selbst zusammen (Abb. G-14).



Abb. G-14: Schematische Darstellung der Faktoren, welche in ihrer Kombination das Gefahrenpotential auf Wanderwegen beeinflussen (nach Lanskron, 2024).

Um diese Komponente in ihrem Zusammenspiel systematisch und vergleichbar bewerten zu können, kommt ein Schema prozessspezifischer Bewertungspfade zum Einsatz, wie es von Lanskron (2024) vorgestellt wurde. Ziel ist die Einschätzung des naturgefahreninduzierten Gefahrenpotentials an einer spezifischen Wegstelle unter Berücksichtigung der jeweiligen lokalen Wegeverhältnisse. Der verwendete Indikator wird als 'Gefahrenpotential' bezeichnet. Dies erfolgt in Abgrenzung zur allgemeinen Unfallgefahr, die bei Aufenthalt im alpinen Raum grundsätzlich vorausgesetzt werden

muss (z. B. Kreislaufprobleme, Sturzgeschehen) und fokussiert stattdessen ausschließlich auf jene Wirkung, die von ausgewählten Naturgefahren unter den gegebenen Bedingungen auf das Wegenetz ausgehen kann. Es wird dabei kein Eintrittszeitpunkt prognostiziert, sondern eine Bewertung der möglichen Auswirkungen im Ist-Zustand vorgenommen.

Auf die Verwendung des Begriffs Risiko wird dabei bewusst verzichtet. Risiko setzt eine Einbeziehung der Vulnerabilität voraus, die sowohl in Bezug auf das Wegenetz als auch auf die Nutzer:innen stark variiert. Diese Unterschiede hängen zudem von der Art der Naturgefahr und ihrer Einwirkungsdauer ab. Eine risikobasierte Darstellung würde daher die angestrebte Übersichtlichkeit sowie die Verständlichkeit für verschiedene Zielgruppen unnötig einschränken – bei gleichzeitig nur geringem Zugewinn an Informationstiefe.

Weiters erfolgt eine Differenzierung nach der jeweiligen Prozessart, da den einzelnen Naturphänomenen unterschiedliche Voraussetzungen, Abläufe und Wirkungen zugrunde liegen und die Auswirkungen auf betroffene Wegabschnitte teils erheblich variieren. Diese Vorgehensweise erlaubt es, die standortspezifisch relevanten Gebietsfaktoren zu integrieren und eine fundierte, an den aktuellen Gegebenheiten orientierte Bewertung durchzuführen. Die bisher bestehenden Bewertungspfade für Stein-/Blockschlag, Murgänge sowie Hochwasser- bzw. Sturzflutprozesse nach Ländskron (2024) wurden im Projektkontext reevaluiert und in weiterer Folge überarbeitet sowie um einen Pfad für Rutschungen/Hangmuren ergänzt.

Die Datengrundlage für die Bewertung wird über zwei methodische Zugänge erzeugt: einerseits durch einen digitalen Survey (siehe nächstes Kapitel), der in Struktur und Inhalt auf die Anforderungen der Bewertungspfade abgestimmt ist, andererseits durch GIS-gestützte Datenextraktion (vgl. Fern- und Fremderkundung), z. B. von vermutetem Permafrostvorkommen.

Grundsätzlich ist das Verfahren gebietsunabhängig einsetzbar und soll langfristig über die Pilotregion hinaus Anwendung finden. Da jedoch bislang ausschließlich Einflussgrößen aus der Pilotregion in der Methodik berücksichtigt wurden, ist vor einer Übertragung eine Validierung in anderen Regionen mit möglichen methodischen Anpassungen erforderlich.

Die Bewertung selbst folgt einer binären Logik: Für jede Wegstelle wird anhand des (Nicht-)Vorliegens definierter Bedingungen entschieden, ob bzw. welches Gefahrenpotential gegeben ist (vgl. Abb. G-15). Gleichzeitig wird geprüft, ob eine vertiefende Prozessmodellierung notwendig ist – z. B. mithilfe von Rockyfor3D (für gravitative Sturzprozesse) oder RAMMS::Debrisflow (für Murgänge und Rutschungen/Hangmuren). Wegstellen mit untergeordnetem Gefahrenpotential werden aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Die Einteilung in Gefahrenpotentialklassen erfolgt in Abhängigkeit von der jeweiligen Prozessart. Bei gravitativen Massenbewegungen (Rutschung/Hangmure, Gerinnemure sowie Stein-/Blockschlag) richtet sich die Einstufung in die Klassen gering, mittel, hoch und sehr hoch nach der Anzahl der identifizierten Gefahrenfaktoren. Im Gegensatz dazu wird bei hydrologisch geprägten Prozessen aufgrund höherer Unsicherheiten bei einer prozessspezifischen Gefahrenbeurteilung lediglich eine binäre Klassifizierung vorgenommen, nämlich in Gefahrenpotential vorhanden oder nicht vorhanden. Für jeden erfassten Prozessbereich wird der entsprechende, dem Prozess zugeordnete Bewertungspfad separat durchlaufen. Um falsch-positive Einschätzungen zu vermeiden, erfolgt im Anschluss eine Relevanzprüfung: Als relevant gelten nur jene Gefahrenstellen, bei denen mögliche Ereignisse konkrete Auswirkungen auf das bestehende Wegenetz haben können.

Die Ergebnisse werden anschließend tabellarisch erfasst und mit einem GIS verknüpft. Diese Daten bilden die Grundlage für die Erstellung von Gefahrenpotentialkarten und können für weiterführende geoinformatische Analysen genutzt werden.

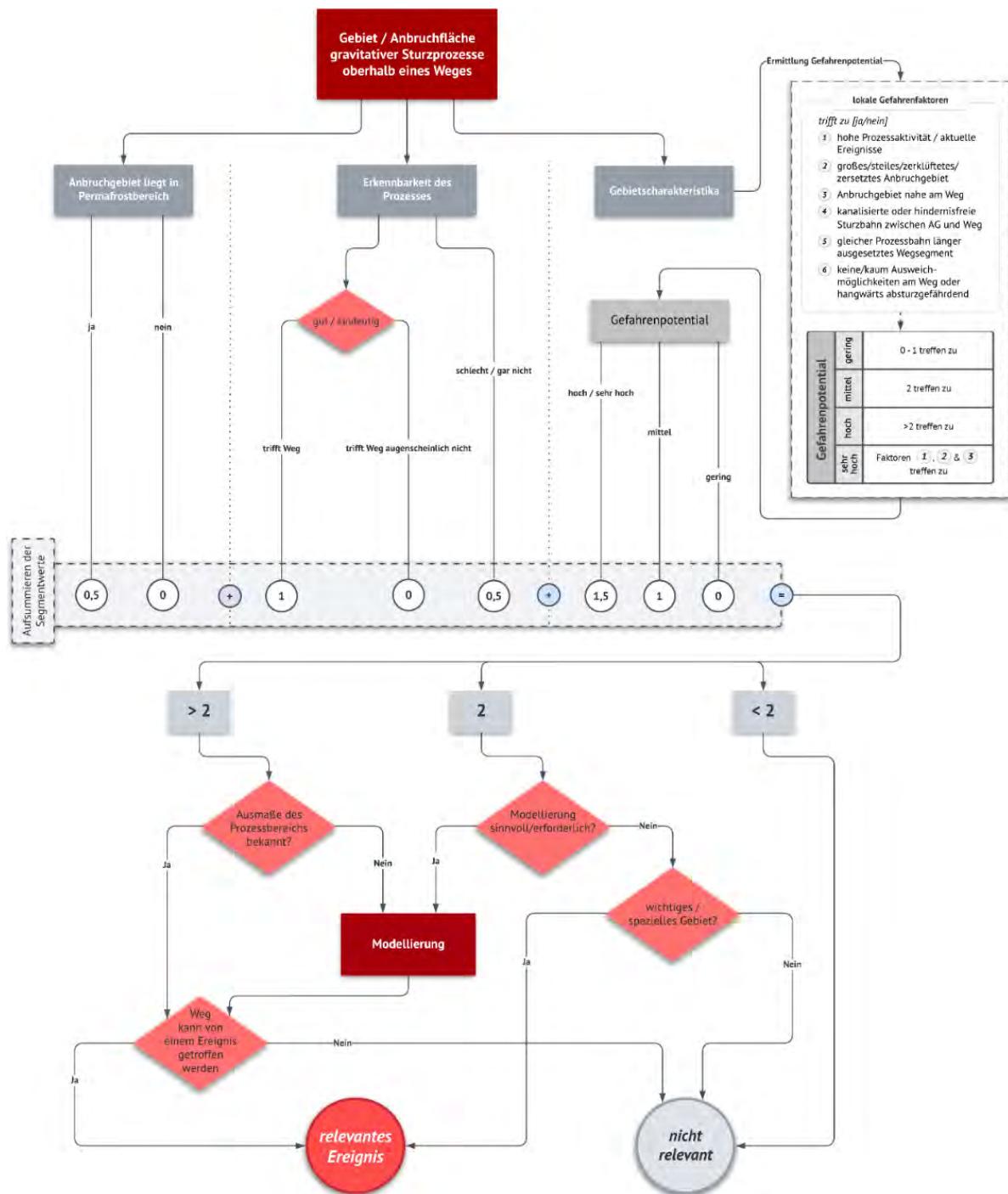


Abb. G-15: Bewertungspfad für gravitative Sturzereignisse (verändert nach Lanskron, 2024).

G-7.4 Digitaler Survey

Für die standardisierte Erhebung der notwendigen Daten für die Anwendung der Bewertungspfade wurden als Zwischenschritt zunächst analoge Feldaufnahmeblätter für die relevanten Prozesse entwickelt. Im Rahmen eines Testlaufs im Pilotgebiet konnten bestehende Limitationen rasch identifiziert werden. Nach anschließender Analyse und Ausarbeitung der erforderlichen Anpassungen wurden die analogen Vorlagen in eine digitale Form überführt. Im weiteren Projektverlauf erfolgten dann grundlegende strukturelle Überarbeitungen sowie die Ergänzung zusätzlicher Inhalte, die ausschließlich digital sinnvoll umsetzbar sind. Das digitale Erhebungsformular wurde dabei noch enger an die Struktur der Bewertungspfade angepasst.

Ziel dieser Umstellung war es, die Datenerhebung effizienter zu gestalten, einer breiteren Nutzer:innengruppe zugänglich zu machen und die spätere GIS-basierte Auswertung zu optimieren – etwa durch die unmittelbare Verortung der erhobenen Daten und den Wegfall manueller Digitalisierungsschritte.

Zum Einsatz kam hierfür ArcGIS Survey123 (ESRI), eine formularbasierte No-Code-Softwarelösung zur mobilen und browsergestützten Datenerfassung. Die Erstellung des digitalen Formulars erfolgte mithilfe des Web-Designers, der über eine Drag-&-Drop-Oberfläche die flexible Anordnung und Anpassung verschiedener Fragetypen ermöglicht. Die gewählte Struktur des Surveys orientiert sich dabei an den Leitfragen 'Wer?' 'Wo?' 'Was?' 'Wann?' und 'Welche Gefahrenpotentiale?', denen jeweils spezifische Subfragen zugeordnet sind (Abb. G-16). Zur besseren Übersicht ist jeder dieser Themenbereiche eine eigene Seite im Formular gewidmet. Ergänzend besteht am Ende die Möglichkeit, optionale Angaben zu subjektiven Eindrücken, Kommentaren und Fotos zu erfassen.

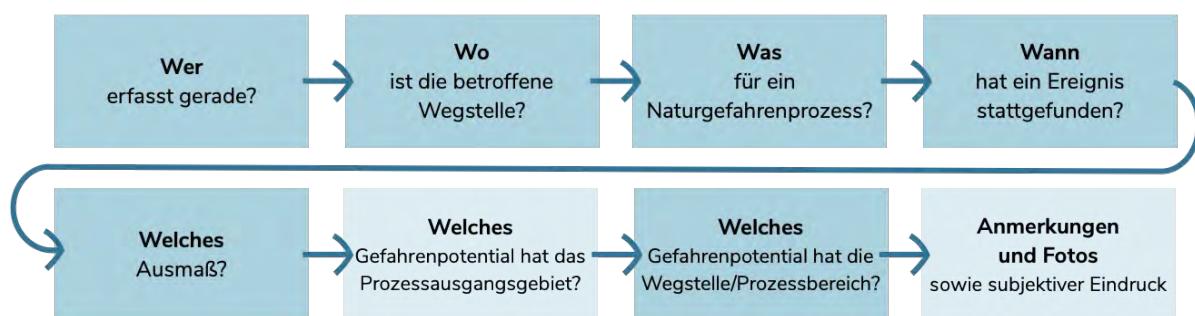


Abb. G-16: Schematische Darstellung der einzelnen Abschnitte des digitalen Surveys zur Erfassung bereits stattgefunder Naturgefahrenereignisse sowie potentieller Gefahrenstellen entlang des alpinen Wegenetzes. Hell hinterlegte Felder stellen optionale Eingabebereiche dar.

Der digitale Fragebogen deckt dabei alle vier der untersuchten Naturgefahrenprozesse (Kap. G-5.2) in einem einzigen Formular ab. Durch die Implementierung logischer Abhängigkeiten innerhalb der Fragenstruktur werden jedoch nur die für den jeweiligen Kontext relevanten Inhalte angezeigt. Dies erhöht zum einen die Übersichtlichkeit und reduziert zum anderen den Erhebungsaufwand. Je nach Art der abgefragten Information werden Single-Choice- oder Multiple-Choice-Fragen verwendet. Bei grundlegenden Angaben, etwa zur Prozessart oder dem Ereignisausmaß, kommen vorwiegend Single-Select-Fragen zum Einsatz. Fragen zur Charakterisierung des Prozessgebiets oder zur Einschätzung des Gefahrenpotentials ermöglichen hingegen eine Mehrfachauswahl. Ergänzend beinhalten diese Fragen ein optionales Freitextfeld ('Sonstiges'), um etwaige unerwartete oder kontextspezifische Angaben zu erfassen. Um eine spätere automatisierte Auswertung besser zu ermöglichen, wurde bei der Gestaltung der Fragen bewusst darauf geachtet, den Einsatz dieser Freitextfeldern auf ein Minimum zu beschränken. Zur Sicherung der Datenqualität sind nahezu alle Fragen – mit Ausnahme der optionalen Felder für subjektive Eindrücke und Fotos – als Pflichtfelder definiert. Dadurch sollen unvollständige oder nicht auswertbare Datensätze bereits im Erfassungsprozess vermieden werden.

Zur Unterstützung der Erfasser:innen wurden im Survey Hilfetexte und erläuternde Bilder integriert, die grundlegende Informationen zu den jeweils abgefragten Prozessen und Themenbereichen bereitstellen. Die visuelle Unterstützung ermöglicht es insbesondere im Gelände, einen direkten Vergleich mit den tatsächlichen Gegebenheiten anzustellen und einen klaren Eindruck der abgefragten Prozesse und Formen zu gewinnen. Die Ausklapp-Informationen dienen einerseits dazu, Missverständnisse über Begrifflichkeiten und Bewertungsmaßstäbe zu reduzieren und damit die Qualität der Angaben zu erhöhen, andererseits unterstützen sie die Sensibilisierung der Nutzer:innen, indem wesentliche Aspekte der Naturgefahrenprozesse kompakt vermittelt werden.

In Hinblick auf die Nutzung auf mobilen Endgeräten sind die Hilfetexte standardmäßig aktiviert, jedoch zunächst eingeklappt, um eine Überfrachtung der Benutzeroberfläche zu vermeiden. Sie können bei

Bedarf aktiv geöffnet und auf Wunsch bereits auf der ersten Formularseite für die laufende oder folgende Erhebungen deaktiviert werden.

Zur Verbesserung der Nutzer:innenfreundlichkeit wurde eine automatische Speicherung wiederkehrender Eingaben, wie etwa des Namens der Erfasser:innen, innerhalb einer aktiven Session implementiert. Eine Session bleibt bestehen, bis der Survey aktiv geschlossen wird. Nach Abschluss einer Eingabe lädt sich das Formular automatisch neu, was eine rasche Mehrfacheingabe unterstützt.

Der Zugriff auf den Survey erfolgt über einen Weblink, der das Formular direkt im Browser öffnet. Über eine URL-Parameterabfrage wird zudem die jeweilige Zuständigkeit automatisch mitübertragen; dieses Feld ist für die Nutzer:innen nicht veränderbar. Die Nutzung der eigenen Survey123-App wurde bewusst ausgeschlossen, da sie individuelle Lizenzen erfordert und Darstellungsprobleme verursachen würde.

Ein wesentliches Merkmal der digitalen Lösung ist die integrierte Verortungsfunktion: Die erhobenen Daten werden als punktbasierte Geometrien gespeichert, wobei sämtliche Antworten als Attributdaten an den jeweiligen Punkt angehängt werden. Im Survey123-Webportal können alle Einträge eingesehen, grafisch aufbereitet und statistisch voranalysiert werden. Zusätzlich ermöglicht eine integrierte Kartenansicht die unmittelbare Visualisierung der Erhebungsorte.

Die erhobenen Daten lassen sich in verschiedenen Formaten exportieren (z.B. .xls, .csv, .shp) oder direkt innerhalb des ESRI-Ökosystems mit den entsprechenden GIS-Programmen weiterverarbeiten. In der aktuellen Projektphase erfolgt die Auswertung der Datensätze zur Erstellung einer Gefahrenpotentialkarte noch manuell. Die gewählte Datenstruktur, -haltung und -formatierung ermöglicht jedoch perspektivisch eine (teil-)automatische Umsetzung sowie eine dynamische graphische Darstellung. Eine erste Echtzeit-Visualisierung der Rohdaten aus dem Survey wurde bereits über eine ArcGIS Online Karte (vgl. Kap. G-9.2: Abb. G-20) realisiert.

G-7.5 Gefahrenpotentialkarten

Die Gefahrenpotentialkarten wurden mit dem Ziel entwickelt, das Gefahrenpotential der untersuchten sommerlichen Naturgefahren in Wandergebieten übersichtlich und informativ darzustellen und dabei unterschiedliche Akteursgruppen gleichermaßen anzusprechen. Grundlage der Darstellungen bilden die Erhebungen aus den digitalen Surveys sowie den Ergebnissen der darauf aufbauenden Bewertungspfade. Neue Surveyeinträge werden direkt in die Datenbank integriert und ermöglichen eine laufende Aktualisierung und Historisierung der Daten.

Je nach Ausdehnung des betroffenen Wegsegments erfolgt eine Unterscheidung zwischen punktuellen und flächenhaften Bereichen. Als punktuell gelten isolierte Ereignisse mit eindeutig zuordbarem, alleinstehendem Anbruchgebiet und limitiertem Prozessraum (< 50 m betroffene Weglänge). Flächenhafte Ereignisse beziehen sich auf homogene Zonen mit ähnlichen Prozesseigenschaften (> 50 m betroffene Weglänge), bei welchen mehrere Anbruchgebiete vorhanden sein können.

Dargestellt werden ausschließlich Bereiche entlang der Wanderwege, in denen Stein-/Blockschlag, Murgänge, Rutschungen bzw. Hangmuren sowie Hochwasser- oder Sturzflutprozesse ein hohes bis sehr hohes Gefahrenpotential aufweisen. Die Darstellung beschränkt sich bewusst auf Bereiche mit einem signifikanten Gefahrenpotential, da nur diese für die zielgerichtete Kommunikation mit den jeweiligen Nutzergruppen von Bedeutung sind. Dadurch soll vermieden werden, dass die Rezipient:innen durch eine Vielzahl geringfügiger Hinweise überfordert werden, bestimmte Regionen falsch einschätzen oder sich durch einen möglicherweise fehlinterpretierten Warncharakter von geplanten Unternehmungen abschrecken lassen (vgl. Lindell, 2020; Pröbstl-Haider et al., 2021). Vielmehr können die relevanten kritischen Bereiche sofort identifiziert werden und einen Überblick über die aktuelle Situation vermitteln. Eine Einführung zur Benutzung der Karte und zusätzliche Hintergrundinformationen dazu werden in den StoryMaps (siehe nächstes Unterkapitel) angeboten.

Die Gefahrenpotentialkarten dienen somit als dezentrales Informationssystem, das sowohl erfahrenen Bergwander:innen als auch unerfahrenen Nutzer:innengruppen als evidenzbasiertes und gebietsabhängiges Zusatzangebot für Wanderungen dient. Während erstere die Karten bei ihrer Tourenplanung berücksichtigen können und in ihrer eigenverantwortlichen Risikoabschätzung gestärkt werden, können Einsteiger:innen durch die Hervorhebung besonders gefährdeter Bereiche (in Kombination mit den StoryMaps) als Einführung in die Thematik sensibilisiert werden. Für Wegewart:innen stellen die kartierten Bereiche Hinweise auf potentiell besonders schadensanfällige Wegabschnitte dar. Insbesondere nach Extremwetterereignissen ist auf diese Bereiche ein besonderes Augenmerk zu richten.

Gefahrenpotentialkarte 2045

Zur Veranschaulichung der allgemein anzunehmenden Auswirkungen der Klimaerwärmung auf das Gefahrenpotential und die räumliche Verteilung der sommerlichen Naturgefahren sowie auf die Höhenentwicklung der klimarelevanten alpinen Elemente wird das Konzept der aktuellen Gefahrenpotentialkarte in ein zukünftiges allgemeines Szenario für das Jahr 2045 übertragen. Der zugrunde gelegte Zeitraum wurde bewusst gewählt: Zum einen gelten nach aktuellem Forschungsstand die Prognosen bis zu diesem Zeitpunkt als weitgehend szenarienunabhängig (APCC, 2025; IPCC, 2023). Zum anderen liegt er für viele Menschen innerhalb ihrer persönlichen Lebensspanne und damit im Bereich der individuellen Vorstellungskraft.

Diese Karte versteht sich dabei als wissenschaftliches Kommunikationsmittel mit Fokus auf die breite Öffentlichkeit. Sie soll exemplarisch aufzeigen, wie sich das Gefahrenpotential der untersuchten Naturgefahrenprozesse sowie Gebietsmerkmale wie Gletscher- und Permafrostvorkommen unter veränderten klimatischen Bedingungen verschieben könnten. Ziel ist es, ein Bewusstsein für klimabedingte Veränderungen konkreter Gefahrenzonen zu schaffen und ein Verständnis möglicher Entwicklungen bis zur Mitte dieses Jahrhunderts zu vermitteln.

Die Karte wird in den StoryMaps veröffentlicht, damit nötige Begleit- und Hintergrundinformationen parallel angeboten werden können. Eine kombinierte Darstellung mit der herkömmlichen, aktuellen Gefahrenpotentialkarte ermöglicht ein besseres Erkennen der temporalen Veränderungen und damit ein besseres Verständnis der kognitiven Botschaft der Karte.

Es wurde angenommen, dass sich die Untergrenzen der Gletscher- und Permafrostflächen im Mittel um ca. 200 m höhenwärts verschieben (vgl. Gobiet et al., 2014) und der Waldbestand um ca. 20 m ansteigt (vgl. Rubel et al., 2017). Entsprechend wurden diese Layer – zur Veranschaulichung für Laien und zur Unterstützung der kommunikativen Zielsetzung – um die entsprechende Höhendifferenz angepasst. Im Anschluss wurden die entsprechenden Bewertungspfade unter dem Aspekt der veränderten klimatisch-geomorphologischen Bedingungen und derer genereller prognostizierter Entwicklungen (vgl. Kap. G-5.3) erneut angewandt.

Da für eine valide Prognose weder ausreichend Messdaten noch belastbare Modellrechnungen verfügbar sind und sich die Geländebeziehungen bis 2045 ohnehin an einzelnen Streckenabschnitten verändern werden, kann die zugrundeliegende Bewertungsmethodik der aktuellen Karte für diesen Zweck nicht wissenschaftlich fundiert angewendet werden. Die Darstellung ist daher ausdrücklich als illustratives Beispiel konzipiert, das die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Gefahrenpotentialen im alpinen Raum sichtbar machen soll.

G-7.6 StoryMaps

Zur Wissensvermittlung und Sensibilisierung wurden im Projekt drei interaktive Webseiten mithilfe von ArcGIS StoryMaps entwickelt. Diese beinhalten eine Projektübersicht sowie thematisch fokussierte Seiten zu den Grundlagen des alpinen Wanderns sowie den alpinen Naturgefahren im Kontext des Klimawandels (Abb. G-17).

Bei ArcGIS StoryMaps handelt es sich um eine karten- und grafikzentrierte Webseiten-Lösung von ESRI, die – ähnlich wie ArcGIS Survey123 (Kap. G-7.4) – ohne jegliche Programmierkenntnisse einsetzbar ist. Im Editor-Modus lassen sich Inhalte modular in einem Baukastensystem zusammenstellen. Texte, Bilder, Überschriften oder verschiedene (interaktive) Kartenformate können dabei flexibel angeordnet und individualisiert werden.

Die beiden thematisch ausgerichteten StoryMaps wurden auf Grundlage der im Projekt erarbeiteten Zielgruppenanalyse (Kap. G-7.1) konzipiert und zeigen exemplarisch auf, wie ein an die Zielgruppe angepasster Wissenstransfer möglich ist. Die erstellen Seiten richten sich vorrangig an Personen mit geringer oder keiner Erfahrung im Wandern und Gebirge. Die inhaltliche Struktur folgt einem ablaufgemäßen Aufbau – von der Tourenplanung bis hin zur Auseinandersetzung mit Naturgefahrenen und klimabedingten Veränderungen entlang alpiner Wege während einer Wanderung. Die Seiten sind inhaltlich aufeinander abgestimmt und über Hyperlinks miteinander verknüpft. Die Texte wurden akteursangepasst in einer niederschwelligen und verständlichen Form verfasst. Zur visuellen Unterstützung wurden eigens entwickelte Grafiken und Animationen in einheitlichem Stil neben den entsprechenden Textblöcken platziert. Ergänzt wird das Angebot durch interaktive Elemente wie Map-Tours und Karten-Slider, die das Verständnis räumlicher Zusammenhänge und Gefahrenkontakte fördern und Nutzer:innen zur aktiven Auseinandersetzung mit den Inhalten anregen sollen. Durch Hyperlinks gelangen die Leser:innen zudem auf weitere externen Seiten, etwa denen des ÖAV, um sich zusätzliche Informationen zu den behandelten Themen einholen zu können.



Gletscherschwund

Weil viele entscheidende Faktoren ineinander spielen und sich bisweilen gegenseitig verstärken, geht das **Abschmelzen** der alpinen Gletscher **immer schneller** vonstatten. Auch die 134-jährige Messreihe des Österreichischen Alpenvereins belegt dies: **In den letzten drei Jahren wurde die höchste (2021/22), dritthöchste (2023/24) und vierthöchste (2022/23) Schmelzrate verzeichnet.**

Besonders ausschlaggebend sind dabei die steigenden Temperatur- und Strahlungswerte und die abnehmende Schneedeckung. Weil sich dieser Zustand in der Zukunft weiter verstärken wird, ist davon auszugehen, dass **innerhalb der nächsten 25 Jahre ein Großteil der heute noch vorhandenen Gletscher in Österreich verschwunden** sein wird. Anstelle der Gletscher werden sich teilweise neue Gletscherseen bilden.

Die Gletscher stabilisieren mit ihren Eismassen die **anliegenden Felswände** und besitzen einen großen Einfluss auf die Fließgewässer und Bodenfeuchte der Gebirgsregionen. Schmelzen sie nur zunehmend ab, führt dies zu mehr und **neu auftretenden Naturgefahrenen**.



Permafrost-Rückgang

Als Permafrost werden **Bereiche im Untergrund** bezeichnet, welche im Jahresverlauf **ständig Temperaturen unter 0 °C** aufweisen. Dies ist aufgrund der generell niedrigeren Temperaturen **meist in großen Höhen** der Fall. Generell ist jedoch das Zusammenspiel der Standorteigenschaften (z.B. Neigung, Schneedeckung, Ausrichtung etc.) und der meteorologisch-atmosphärischen Bedingungen (z.B. Lufttemperatur, Sonnenscheindauer etc.) ausschlaggebend.

Abb. G-17: Bildschirmaufnahme aus der StoryMap zu alpinen Naturgefahrenen und Klimawandel in den Alpen. Die Texte sind auf einem für Laien zugänglichen Niveau gehalten; die Abbildungen sind in der Webversion animiert.

G-8 Expert:innenworkshop

Ein zentrales Ziel im Rahmen des Projekts war der Austausch mit fachlich einschlägigen Expert:innen, um Erfahrungswerte und neue Perspektiven zur behandelten Problemstellung zu gewinnen sowie gezieltes Feedback zum methodischen Vorgehen einzuholen. Zu diesem Zweck wurde am 12.03.2025 ein Expert:innenworkshop in den Räumlichkeiten des Österreichischen Alpenvereins (ÖAV) in Innsbruck abgehalten.

G-8.1 Teilnehmer und Ablauf

Neben dem Projektleiter Marco Gabl, MSc, (Universität Innsbruck und ÖAV) nahmen die beiden Projektmitarbeiter Simon Landskron, MSc, und Luca Korosec, BSc, (beide Universität Innsbruck) teil. Aus dem Advisory Board war Ing. Mag. Martin Ladner, PhD. (Universität Innsbruck) vertreten. Vervollständigt wurde die Runde durch die eingeladenen Experten, allesamt mit langjähriger Erfahrung im alpinen Raum und Naturgefahrenmanagement:

Dipl.-Ing. Peter Kapelari

Allgemein beeideter und gerichtlich zertifizierte Sachverständiger, selbständiger Alpinexperte und ehemaliger Leiter der Abteilung 'Hütten, Wege und Kartographie' sowie ehemaliges Mitglied der Geschäftsführung des ÖAV. Mitentwickler des Werkzeugs R.A.G.N.A.R. zur 'Risikoanalyse gravitativer Naturgefahren im alpinen Raum'; weiters tätig als Berater für alpines Risikomanagement und -kommunikation.

Dipl.-Ing. Georg Unterberger

Leiter der Abteilung Hütten und Wege beim ÖAV; zuvor langjährig ehrenamtlich im Verein tätig, zuletzt als Wegewart.

Mag. Werner Beer

Geoinformatiker beim ÖAV im Bereich Digitale Services mit Zuständigkeit für Kartographie; zudem aktiver Bergretter.

Mag. Walter Würtl

Alpinwissenschaftler, staatlich geprüfter Berg- und Skiführer sowie zertifizierter Alpin-Sachverständiger. Bei 'Lola Peak Solutions' zuständig für Projekte im Bereich alpines Risikomanagement (u.a. R.A.G.N.A.R.); zudem Expertenmitglied im Kuratorium für alpine Sicherheit.

Der Ablauf des Workshops war in zwei getrennte Blöcke gegliedert: Im ersten Teil wurde das Projekt, die zugrunde liegende Problemstellung, die gewählte Methodik sowie die Zielsetzungen vorgestellt; im zweiten Teil folgte die Präsentation der ausgearbeiteten Akteursgruppen und Bewertungspfade. Im Anschluss an beide Präsentationen fanden jeweils rund einstündige Diskussionsrunden statt, die bewusst offen gestaltet waren, um den Experten Raum für freie Reaktionen zu geben. Gleichzeitig wurde die Diskussion immer wieder durch gezielte Fragestellungen moderiert, um zentrale Aspekte des Projekts zu vertiefen und relevante Impulse für die methodische Weiterentwicklung zu gewinnen.

G-8.2 Zentrale Erkenntnisse und Impulse

Die folgenden Punkte fassen die Kernaussagen, Anregungen und weiterführende Hinweise des fachlichen Austausches zusammen:

Stärkung von Eigenverantwortung und rechtlicher Absicherung

Die Wahrung und Betonung der Eigenverantwortung von Freizeit- und Bergsportler:innen im Umgang mit alpinen Naturgefahren ist zentraler Bestandteil eines verantwortungsvollen Risikomanagements im alpinen Raum. Gleichzeitig besteht ein deutlich artikulierter Bedarf an rechtlicher Absicherung für die ehrenamtlich tätigen Wegewart:innen und Wegehalter:innen. Zur Stärkung des Verständnisses für

deren Aufgaben und zur Einordnung der oft einzelfallbezogenen Rechtslage wurde angeregt, juristische Expertise gezielt einzubinden.

Integration zusätzlicher Gefahrenaspekte und Datenebenen

Es wurde empfohlen, Hangmuren und spontane Rutschungen künftig stärker in die Gefahrenanalysen einzubeziehen und mehr von den Gerinnemuren zu entkoppeln. Darüber hinaus könnten Risiken, die von Biosphäre, Vegetation und Fauna ausgehen, ebenfalls systematisch erfasst und integriert werden. Der noch außer Acht gelassene Themenbereich der 'Waldgefahren' wurde insbesondere im Zusammenhang mit einer möglichen Verknüpfung zur Baumkontrolle als relevanter Entwicklungsschwerpunkt hervorgehoben.

Plattformstrategie und Datenhoheit

Sinnvoll wäre laut den Experten der Aufbau bzw. das Einpflegen der Projektdaten in eine einheitliche zentrale Datenbank, auf die alle relevanten Akteur:innen – wie Wegehalter:innen, Baumhalter:innen, Hüttenwirt:innen sowie die zuständigen Vereine – Zugriff haben, um Pflege, Kontrolle und Aktualisierung effizienter zu gestalten und redundante Arbeitsschritte zu vermeiden. Die zentrale Datenhaltung bei den alpinen Vereinen wurde dabei ausdrücklich als wesentlich erachtet, um sicherzustellen, dass die Hoheit über die Wege klar bei den jeweiligen Halter:innen verbleibt. So wurde die Erfassung von Gefahrenstellen oder Schäden durch Laien, wie sie teils bei Community-basierten Plattformen vorgesehen ist, sehr kritisch bewertet. Insbesondere wurden erhebliche rechtliche Bedenken hinsichtlich Datenkontrolle, Verantwortlichkeit und Haftungsrisiken geäußert. Professionell erhobene Daten durch fachkundige Akteur:innen wie den Wegewart:innen können ihrer Ansicht nach nicht mit jenen von der allgemeinen Community erfassten Informationen gleichgesetzt werden.

Kommunikation von Naturgefahren

Die Kommunikation von Gefahrenpotentialen sollte klar und zielgruppenorientiert erfolgen, mit einem Fokus auf einer differenzierten Darstellung atypischer, besonderer oder deutlich erhöhter Ereignisbereiche. Alltägliche und allgegenwärtige alpine Gefahren sollten bewusst ausgeklammert werden, um die Eigenverantwortung der Nutzer:innen nicht zu untergraben, da im alpinen Raum stets mit einem Restrisiko gerechnet werden muss. Zudem sollte deutlich vermittelt werden, dass auch außerhalb der kommunizierten Gefahrenbereiche Risiken vorhanden sind, um etwa haftungsrechtliche Fehlinterpretationen zu verhindern. Genauso sei eine Dramatisierung durch eine 'Politik der Angst' zu vermeiden.

Zukunftsansichten und dynamische Karten

Angeregt wurde zudem der Aufbau einer dynamischen Webplattform, die klimawandelbedingte Veränderungen und deren Auswirkungen auf Naturgefahrenlagen abbildet. Gerade interaktive Karten könnten im Vergleich zu statischen helfen, zukünftige Entwicklungen sowie veränderte Dispositionen von Gefahrenprozessen sichtbarer und nachvollziehbarer darzustellen. Ergänzend wurde empfohlen, die Informationsweitergabe an Wegewart:innen gezielt um Wetterprognosen zu erweitern sowie Hinweise auf klimabedingte Gefährdungen in deren Arbeitsgebieten herauszuarbeiten.

G-8.3 Fazit zum Expertenworkshop

Grundsätzlich wurde das Projektvorhaben in vielerlei Hinsicht positiv bewertet und in seinem Ansatz bestärkt. Die fachliche Relevanz wurde von sämtlichen Expert:innen unterstrichen – insbesondere im Hinblick auf den Rückgang ehrenamtlichen Engagements sowie die zunehmenden Herausforderungen durch den Klimawandel. In diesem Kontext wurde betont, dass Wegehalter:innen verstärkt auf praxistaugliche Tools zur effizienten Wegewartung und zur Sensibilisierung der Nutzer:innen angewiesen sind. Nur so könne eine nachhaltige Anpassung an die neuen Anforderungen gelingen.

Im Zuge der Diskussionen wurden eine Reihe wertvoller Anregungen formuliert, von denen einzelne direkt in das Projekt integriert werden konnten. So wurden die Bewertungspfade (vgl. Kap. G-7.3 & G-9.1) dahingehend überarbeitet, dass Hangmuren und Rutschungen getrennt von Gerinnemuren erfasst und deren Gefahrenpotential separat bewertet werden. Zudem wurde der Vorschlag einer

dynamischen Karte zur eigenständigen Erkundung von Naturgefahren und deren klimawandelbedingten Veränderungen aufgegriffen und in die akteursangepassten StoryMaps integriert.

Ein zentraler Impuls betraf auch die inhaltliche und kommunikative Fokussierung auf das Prinzip der Eigenverantwortung. In der Darstellung von Gefahrenpotentialen wird bewusst auf atypische, besondere oder deutlich erhöhte Naturgefahrenereignisse fokussiert. Dabei wird explizit kommuniziert, dass die Abwesenheit eines Eintrags auf der Karte keinesfalls als Gefahrenfreiheit zu interpretieren ist – ein Aspekt, der insbesondere für weniger erfahrene Nutzer:innen von Bedeutung ist.

Zugleich wurde darauf hingewiesen, dass der gegenwärtige Ansatz für die Experten in erster Linie einen Mehrwert für Freizeit- und Bergsportler:innen bietet, während die Zielgruppe der Wegehalter:innen bislang nur unzureichend adressiert wird. Für deren Arbeitsalltag wäre beispielsweise eine Kombination der Gefahrenpotentialkarte mit aktuellen Wetterprognosen und spezifischen Hinweisen zu klimawandelbedingten Risikolagen von besonderer Bedeutung – ein Aspekt, der in zukünftigen Projekten berücksichtigt werden sollte.

Darüber hinaus wurde weiterführender, thematisch breiter Input gegeben, der zwar den Rahmen des aktuellen Projekts übersteigt, jedoch bereits in internen Diskussionen für mögliche Folgeprojekte aufgegriffen wurde. Dazu zählen beispielsweise die Berücksichtigung von Waldgefahren, Risiken durch Giftpflanzen oder Weidevieh sowie die Erweiterung der Akteursgruppen um juristische Fachpersonen, um die rechtlichen Rahmenbedingungen und Herausforderungen von Wegehalter:innen stärker in die Systematik einzubinden.

G-9 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die zentralen Ergebnisse des Projekts vorgestellt und jeweils abschließend kritisch eingeordnet. Da es sich dabei überwiegend um digitale Produkte wie den Survey und die StoryMaps handelt, können diese hier lediglich exemplarisch anhand von Abbildungen dargestellt werden. Ein vollständiger Zugriff ist online unter av-geo-clim-uniibk.hub.arcgis.com möglich; ergänzende Inhalte finden sich im Anhang.

G-9.1 Bewertungspfade

Die Bewertungspfade bilden das methodische Kerninstrument des Projekts. Sie ermöglichen eine strukturierte Analyse der über den digitalen Survey erfassten Daten und dienen der Klassifizierung hinsichtlich des naturgefahrenbedingten Gefahrenpotentials. Darauf aufbauend erfolgen auch die weiteren Arbeitsschritte, wie die Erstellung der Gefahrenpotentialkarte oder die gezielte Kommunikation relevanter Gefahrenbereiche an betroffene Akteur:innen.

Ausgangspunkt dafür bildeten die von Landskron (2024) entwickelten Bewertungsschemata, welche im Rahmen des Projekts hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit geprüft, inhaltlich überarbeitet und erweitert wurden. So wurde etwa im Pfad für Stein- und Blockschlag ein zusätzlicher Gefahrenfaktor ergänzt: das Vorliegen einer kanalisierten oder hindernisfreien Sturzbahn zwischen Anbruchgebiet und Weg. Diese Modifikation trägt zu einer realistischeren Einschätzung der Gefährdungslage bei. Zudem wurde die bisher dreistufige Klassifizierung um die Kategorie 'sehr hoch' erweitert. Diese kommt bei Vorliegen definierter Kriterien zur Anwendung und erhöht durch ein objektives Verfahren die Präzision der Bewertung.

Als Reaktion auf Rückmeldungen aus dem Expertenworkshop (Kap. G-8) wurde zudem ein zusätzlicher eigener Bewertungspfad für die Prozesskombination 'Rutschungen/Hangmuren' (Kap. G-5.2.1) erarbeitet (Abb. G-18). Damit erfolgte eine methodische Trennung von den bisher identisch bewerteten 'Gerinnemuren'. Somit wird eine differenzierte Analyse und Klassifikation der jeweiligen Prozesscharakteristika mit ihren divergierenden Ausprägungen ermöglicht. Dies hat den Vorteil, gezielter auf die Eigenschaften und die bei den Prozessdynamiken hineinspielenden Faktoren der genannten Prozesse eingehen zu können, was letztendlich zu fundierteren Bewertungen der Naturgefahren führt. Im Zuge dessen wurden auch die Prozessunterscheidung und damit zusammenhängende Komponenten wie die Identifizierung der Prozessabläufe oder die Altersbestimmung im eng mit den Bewertungspfaden verknüpften Aufnahmeverfahren des digitalen Surveys in Terminologie und inhaltlicher Ausrichtung aufeinander abgeglichen.

Trotz der Anpassungen bleiben gewisse systemimmanente Unsicherheiten in der Methodik bestehen. So birgt die notwendigerweise im Gelände durchzuführende Datenerfassung mögliche Fehlerquellen wie beispielsweise eine Fehlzuordnung von 'Stummen Zeugen'. Dies kann sich folglich durch den gesamten Bewertungsprozess ziehen und das Ergebnis verzerrn. Diese Schwächen werden allerdings teilweise dadurch kompensiert, dass Unschärfe im Zweifelsfall zu einer tendenziell konservativeren, also eher über- als unterschätzenden, Gefahreneinstufung führen. Zudem wird die Aussagekraft der Methode durch die hohe Aktualität und Qualität der erhobenen Felddaten gestützt.

Ein weiterer Vorteil der Bewertungsmethode liegt in der Einfachheit ihrer Struktur: Das Konzept erlaubt die Datenaufnahme mittels eines einfach anwendbaren digitalen Surveys, welcher auch von geübten Laien bedient werden kann und in diesem Zuge zur Sensibilisierung für Naturgefahren beitragen kann.

Das Bewertungsverfahren ermöglicht insgesamt eine fundierte, praxisorientierte und differenzierte Klassifizierung naturgefahrenbedingter Gefahrenstellen entlang alpiner Wanderwege. Zugleich fungieren die Bewertungspfade als integrierter Filter, der den Fokus gezielt auf relevante, außergewöhnliche Ereignisse lenkt. Dies erleichtert insbesondere die Erstellung der Gefahrenpotentialkarte (vgl. Kap. G-7.5), da keine zusätzliche Selektion alltäglicher bzw. irrelevanter Ereignisse

erforderlich ist. Die binäre Struktur der Schemata unterstützt zudem eine künftige Automatisierung der Auswertung sowie die direkte Kopplung mit dem digitalen Survey.

Die Methodik wurde bislang ausschließlich in der Pilotregion erprobt und auf Basis der dort vorherrschenden Parameter entwickelt (Landskron, 2024). Eine Übertragbarkeit auf vergleichbare Gebirgsräume ist aufgrund geomorphologischer Ähnlichkeiten grundsätzlich gegeben. Für eine flächendeckende oder überregionale Anwendung sind jedoch spezifische Anpassungsschritte erforderlich (vgl. Kap. G-10).

Die Bewertungspfade stellen – bei entsprechender Kalibrierung auf das Untersuchungsgebiet und qualitätsgesicherter Datengrundlage – ein robustes und praktikables Instrument für Expert:innen zur Einschätzung naturgefahrenbedingter Gefährdungen entlang von Wanderwegen dar. Im Unterschied zu technisch-fernerkundlichen Verfahren der Gefahrenzonierung (vgl. Lieb et al., 2010) verfolgt die hier angewandte Methodik bewusst einen partizipativen Ansatz, nutzt aktuelle, vor Ort erhobene Informationen und bereitet diese gezielt zur nutzerorientierten Weiterverwendung auf.

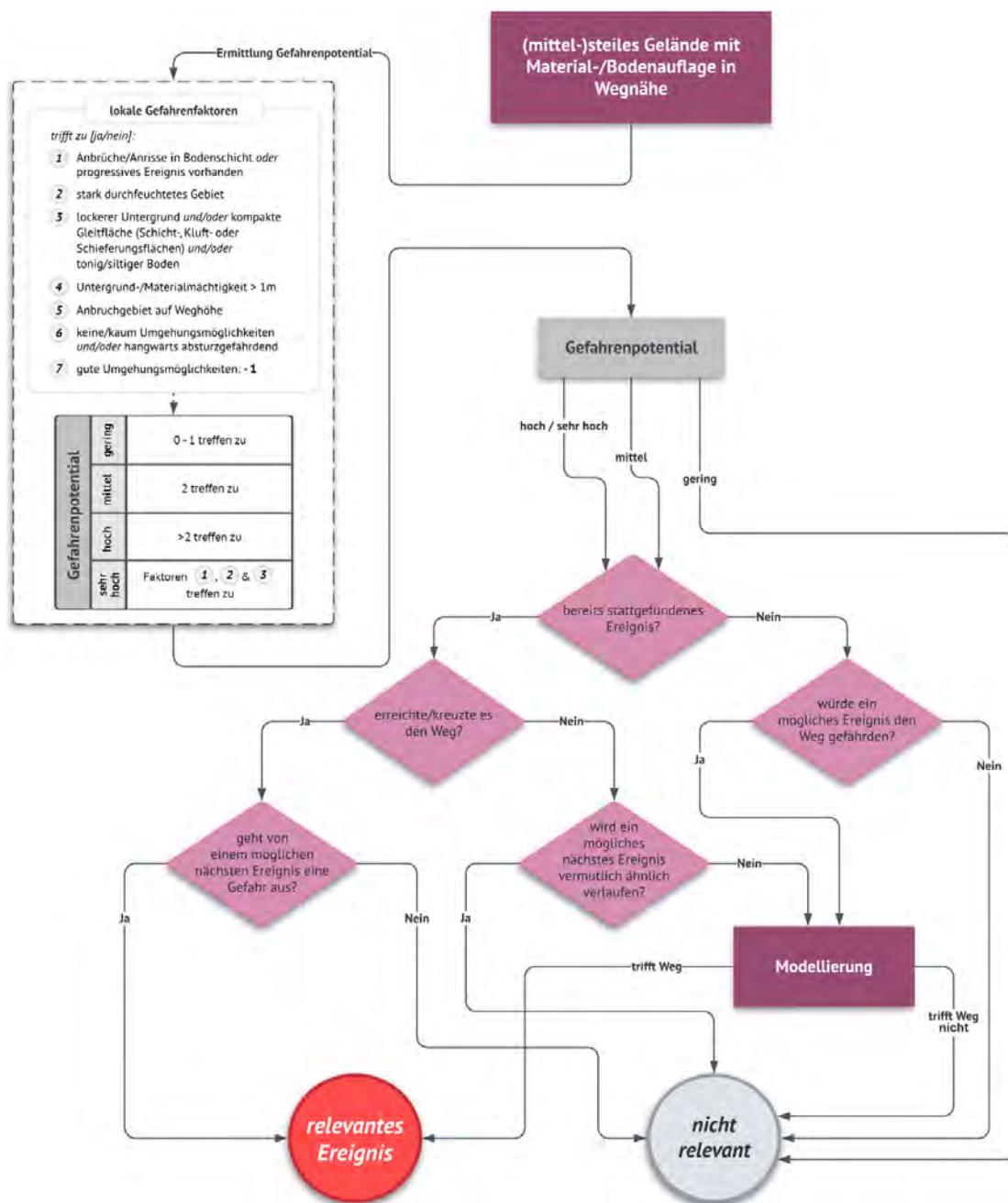


Abb. G-18: Bewertungspfad für Rutschungs- und Hangmurprozesse (nach Landskron, 2024).

G-9.2 Digitaler Survey

Ein essentielles Teilergebnis des vorliegenden Projekts ist die Entwicklung eines Erhebungsinstruments zur strukturierten und standardisierten Erfassung der Gefahrenstellen entlang alpiner Wege. Ziel war es, eine effiziente, digitale Lösung zu schaffen, mit der die Anwendung der Bewertungspfade relevanten Daten unmittelbar im Gelände erhoben und anschließend ohne weiteren Umwandlungsaufwand in GIS-Anwendungen weiterverarbeitet werden können. Umgesetzt wurde dies mit Hilfe von ArcGIS Survey123. Ergänzend entstand zudem eine Dokumentation mit den zentralen Anwendungsschritten sowie eine gekürzte Version in Form eines ReadMe-Dokuments (Anhang; Kap. G-12), welche den Nutzer:innen zur schnellen Einarbeitung in das digitale Erfassungsformular zur Verfügung stehen.

Die Struktur des digitalen Surveys wurde dabei in enger Anlehnung an die zuvor entwickelten Bewertungspfade (Kap. G-7.3 & G-9.1) aufgebaut und in einer logisch nachvollziehbaren Abfolge strukturiert. Diese soll eine intuitive Bearbeitung durch die Nutzer:innen ermöglichen und gleichzeitig eine hohe Datenqualität sicherstellen. Konzipiert wurde der Survey in erster Linie für die Zielgruppe der Wegewart:innen, da diese durch ihre langjährige Erfahrung sowie ihre ausgeprägten Orts- und Prozesskenntnisse über ein fundiertes Verständnis naturgefahrenrelevanter Prozesse verfügen.

Nach der Eingabe personenbezogener Informationen – wie Name und zugehörige Sektion (diese wird automatisch über den personalisierten Zugriffslink vorausgefüllt) – wird den Nutzer:innen eine kurze Einführung in die Funktion und den Aufbau des Formulars gegeben. Zudem besteht an dieser Stelle die Möglichkeit, die standardmäßig aktivierten Kurzinfos zu den abgefragten Prozessen zu deaktivieren. Diese Hilfetexte sowie ergänzende, aussagekräftige Bilder dienen einerseits der Sensibilisierung der Erfasser:innen und andererseits der Sicherstellung einer möglichst einheitlichen und nachvollziehbaren Datenerhebung. Die Informationen können im Formular bei Bedarf über ein Ausklapp-Menü eingeblendet werden, ohne die Übersichtlichkeit auf mobilen Geräten einzuschränken.

Ein wesentlicher Vorteil der digitalen Lösung gegenüber der klassischen, analogen Felddatenerhebung liegt vor allem in der integrierten Verortungsfunktion (Abb. G-19). Durch die Nutzung der Standortfunktion handelsüblicher Smartphones kann der Erhebungsstand metergenau und automatisch in den Daten gespeichert werden. Die Genauigkeit der Ortung der mobilen Endgeräte erweist sich dabei im Hinblick auf den geplanten Einsatzzweck als vollkommen ausreichend.

Im Anschluss an die Erfassung der prozessrelevanten Parameter (vgl. Abb. G-19), die für die spätere Bestimmung des jeweiligen Gefahrenpotentials notwendig sind, bietet der Survey die Möglichkeit, ergänzende Anmerkungen hinzuzufügen und – sofern erforderlich – Fotos der Situation vor Ort zu hinterlegen. Nach Abschluss der Erhebung wird über einen Link ein direkter Zugang zu einer Online-Karte bereitgestellt (Abb. G-20), in der alle bislang erfassten, jedoch noch unbewerteten Gefahrenstellen und Ereignisse eingesehen werden können.

Die Nutzung des digitalen Erhebungsinstruments setzt dabei lediglich ein internetfähiges Smartphone mit aktiver Netzanbindung voraus. Eine stabile Internetverbindung kann jedoch insbesondere im hochalpinen Raum eine Herausforderung darstellen. Eine mögliche Alternative wäre die Verwendung der dedizierten Survey123-App, welche einen Offline-Modus ermöglicht. Diese Option bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass sie eine individuelle Lizenzierung für jede:n Nutzer:in erfordert und somit mit zusätzlichen Kosten verbunden ist.

Besonderes Potential liegt in der nahtlosen Einbindung des Surveys in das bestehende ESRI-Ökosystem. Die erhobenen Daten sind nicht nur unmittelbar GIS-kompatibel, sondern lassen sich ohne zusätzliche Konvertierung direkt in Anwendungen wie ArcGIS Online, ArcGIS Pro oder Dashboards weiterverarbeiten. Damit entfällt ein wesentlicher Teil des bisherigen Nachbearbeitungsaufwands. Gleichzeitig schafft die strukturierte Datenerhebung die Grundlage für eine perspektivische (Teil-)Automatisierung der Auswertung und für die Darstellung von Gefahrenpotentialen.

Insgesamt stellt der entwickelte digitale Survey ein effizientes Werkzeug zur standardisierten Erfassung naturgefahrenrelevanter Informationen dar. Er kombiniert eine anwenderfreundliche Bedienoberfläche mit einer technisch leistungsfähigen Datenstruktur und bietet damit eine zukunftsorientierte Grundlage für die Gefahrenbewertung entlang alpiner Wege.

<p>AV.GEO.CLIM - Erfassungsformular ...</p> <p>Verortung</p> <p>Wo befindet sich die betroffene Wegstelle?*</p> <p>Tippe dazu auf das "Standort-Erkennen-Icon" (GPS Freigabe notwendig) oder platziere den blauen Marker mit dem Fadenkreuz in der Karte an der richtigen Stelle und tippe dann rechts oben auf OK.</p> <div style="text-align: center;"> <p>Lat: 47.143532 Lon: 11.269546</p> </div> <p>Wie lang ist die betroffene Wegstelle?*</p> <p>welche von der potentiellen oder dem stattgefundenen Prozess beeinträchtigt/gefährdet wird.</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="radio"/> unter 10m <input checked="" type="radio"/> 10m-50m <input type="radio"/> 50m-100m <input type="radio"/> 100m-200m <input type="radio"/> über 200m <p>Back Next</p> <p style="text-align: center;">Page 2 of 6</p>	<p>AV.GEO.CLIM - Erfassungsformular ...</p> <p>Gefahren</p> <p>Mehrere Gefahrenarten an derselben Stelle? Bitte füll das Formular dafür mehrfach aus.</p> <p>Welche Gefahrenart liegt vor?*</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> Felssturz, Stein- oder Blockschlag <input type="radio"/> Rutschung, Hang- oder Gerinnemure <input type="radio"/> Sturzflut oder Hochwasser (bzw. Überschwemmung) <p>INFO: Felssturz</p> <p>INFO: Stein- oder Blockschlag</p> <p>Definition, Entstehung und Unterscheidung</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>Prozessbeschreibung: Stein- oder Blockschlag bezeichnen das plötzliche Herafallen von Gestein aus steilen Hängen oder Felswänden. Die Gesteinsstücke prallen, springen oder rollen mit hoher Geschwindigkeit den Hang hinab.</p> <p>Entstehung: Solche Abbrüche werden durch Witterungseinflüsse wie Frost-Tau-Wechsel, starke Niederschläge, Permafrost-Rückgang oder mechanische Einwirkungen ausgelöst. Dabei lösen sich einzelne Steine (Steinschlag/Durchmesser unter 50cm) oder größere Gesteinsblöcke (Blockschlag/Durchmesser über 50cm) vom Fels.</p> <p>Unterschied Steinschlag vs. Blockschlag: Steinschlag betrifft kleinere Gesteinsstücke (Durchmesser unter 50cm), die meist mit hoher Geschwindigkeit hangabwärts prallen oder springen. Beim Blockschlag handelt es sich um deutlich größere, schwere Felsblöcke (Durchmesser über 50cm), die meist rollen oder stoßweise talwärts gleiten und erheblich mehr Energie und Zerstörungskraft entwickeln.</p> <p>Unterschied zu Felssturz: Im Gegensatz zum punktuellen Stein- oder Blockschlag brechen beim Felssturz ganze Felspartien (Volumen zwischen 100 bis 1. Mio Kubikmeter) auf einmal ab. Diese zerteilen sich beim Aufprall meist wiederum in Blöcke und Steine.</p> <p>Bildquelle</p> <p>Prozessdimension*</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="radio"/> Steinschlag (Durchmesser < 50cm) <input type="radio"/> Blockschlag (Durchmesser > 50cm) <input type="radio"/> Felssturz (Volumen > 100 bis 1 Mio. Kubikmeter) 	<p>AV.GEO.CLIM - Erfassungsformular ...</p> <p>Gefahrenfaktoren im Prozess-Ausgangsgebiet</p> <p>Anzahl der Anbruchgebiete*</p> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; width: fit-content;"> <input checked="" type="radio"/> 3 </div> <p>INFO: Anzahl der Anbruchgebiete</p> <p>Unterteilung von Anbruchgebieten</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>Anbruchgebiete erkennt man an frischen Abbruchstellen, freiliegendem Fels oder fehlender Vegetation. Sind diese Stellen durch bewachsene Flächen, Geländekanten oder kleine Gräben getrennt, spricht man von mehreren Anbruchgebieten. Auch unterschiedlich verteiltes Gesteinsmaterial am Hangfuß kann darauf hinweisen.</p> <p>Eigenschaften des Anbruchgebiets*</p> <p>Wähle die zutreffenden Eigenschaften aus oder ergänze weitere unter "Sonstiges".</p> <ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> hohe Prozessaktivität <input type="checkbox"/> liegt (wahrscheinlich) im Permafrostbereich <input checked="" type="checkbox"/> hat Fläche von > 250qm <input checked="" type="checkbox"/> hat Neigung > 70° <input type="checkbox"/> ist stark zerklüftet oder hat markantes Trennflächengefüge <input checked="" type="checkbox"/> ist nahe des Weges (<25m) <input type="checkbox"/> KEINES DER GENANNTEN <input type="checkbox"/> Sonstiges: <p>Back Next</p> <p style="text-align: center;">Page 4 of 6</p>
---	--	---

Abb. G-19: Bildschirmaufnahme des digitalen Erfassungsformulars, exemplarisch ausgefüllt für den Prozess Steinschlag: Seite 2 (links) zur Verortung der Gefahrenstelle, ein Ausschnitt von Seite 3 (mittig) mit Prozesseinordnung und ausgeklappter INFO-Kurzbeschreibung sowie Seite 4 mit den prozess-abhängigen Fragen zu Gefahrenfaktoren.

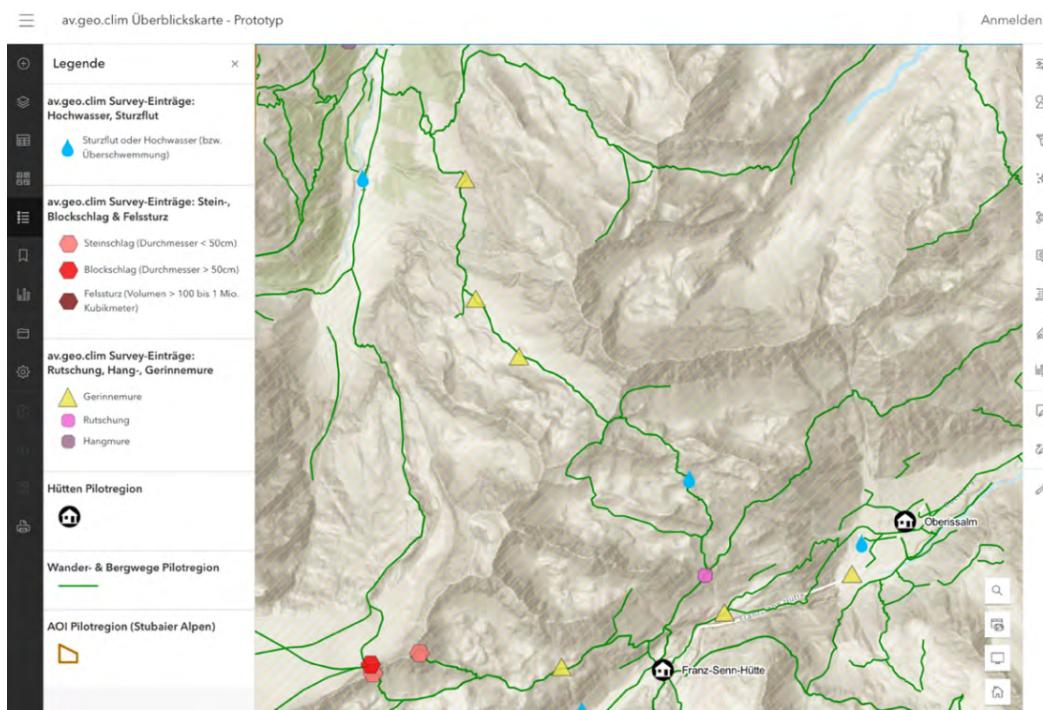


Abb. G-20: Bildschirmaufnahme der Echtzeit-Webkarte zur Übersicht der im digitalen Survey erfassten Einträge. In dieser beispielhaften Abbildung handelt es sich um reine Testeinträge zur Veranschaulichung der Funktionsweise.

G-9.3 Gefahrenpotentialkarten

Die Gefahrenpotentialkarte ermöglicht eine rasche, zielgerichtete Identifikation jener Wegstellen, an denen durch die untersuchten Naturraumprozesse eine erhöhte Gefahr ausgeht. Durch eindeutige Symbolik und differenzierte Farbgebung lassen sich die Gefahrenstellen klar unterscheiden und den jeweiligen Prozessen zuordnen. Zudem wird zwischen punktuellen Ereignisbereichen und ausgedehnten, länger exponierten Wegsegmenten unterschieden. Für die Anwender:innen nicht ersichtlich ist hingegen die vorab durchgeführte Selektion der Gefahrenprozesse hinsichtlich ihrer Relevanz für das Wanderwegewesen sowie die bewusste Verwendung einer adressatengerechten Kommunikationsform (vgl. Lieb et al., 2010). Nicht zuletzt dient etwa die Umwandlung der Gefahrenpotentialklassen in symbolische Darstellungen ('hoch' → '+', 'sehr hoch' → '++') der Reduktion interpretativer Barrieren. So wird unter der Einbindung erklärender Begleitinformationen und einer strukturierten grafischen Aufbereitung im Sinne Lindells (2020) eine niederschwellige Vermittlung auch für fachfremde Nutzer:innen ermöglicht. Ergänzend zur Prozessdarstellung werden auch klimawandelbetroffene Geofaktoren wie Gletscher- und Permafrostverbreitung in die Karte eingebunden. Damit wird ein Zusammenhang zwischen Klimaentwicklung, Naturgefahren und den Herausforderungen für die alpine Infrastruktur hergestellt, der weiter zur Sensibilisierung der unterschiedlichen Nutzergruppen beitragen soll. Fachkundige Nutzer:innen, insbesondere Wegewart:innen, erhalten gleichzeitig verwendbare Informationen zur gezielten Einbindung in ihre Tätigkeit.

Die vorliegende Kartengestaltung ist als exemplarischer Vorschlag zu betrachten, der auf ein möglichst breites Spektrum an Nutzer:innen ausgerichtet ist. Dabei soll er sowohl den informativen Anforderungen genügen als auch den Kommunikationsgegenstand nutzergerecht transportieren. Aufgrund des hohen Informationsgehalts und für ein Verständnis notwendiges Grundwissen sind die Karten mehr für in der Thematik bewanderte Personengruppen geeignet. Trotzdem sollen auch Einsteiger und Interessierte durch ausführliche Zusatzinformationen in den StoryMaps einen (initialen) Zugang finden und angesprochen werden. Eine mögliche Erweiterung stellt eine dreidimensionale Visualisierung dar, die eine zusätzliche räumliche Orientierung erlauben würde.

Aktuell

Das klassifizierte Gefahrenpotential, das von ausgewählten Naturprozessen entlang des Wegenetzes der Pilotregion in den Stubaier Alpen ausgeht, ist in Abbildung G-21 dargestellt. Die Karte erlaubt Rückschlüsse auf Verteilungsmuster der Ereignisse hinsichtlich Prozessvorkommen und Höhenlage.

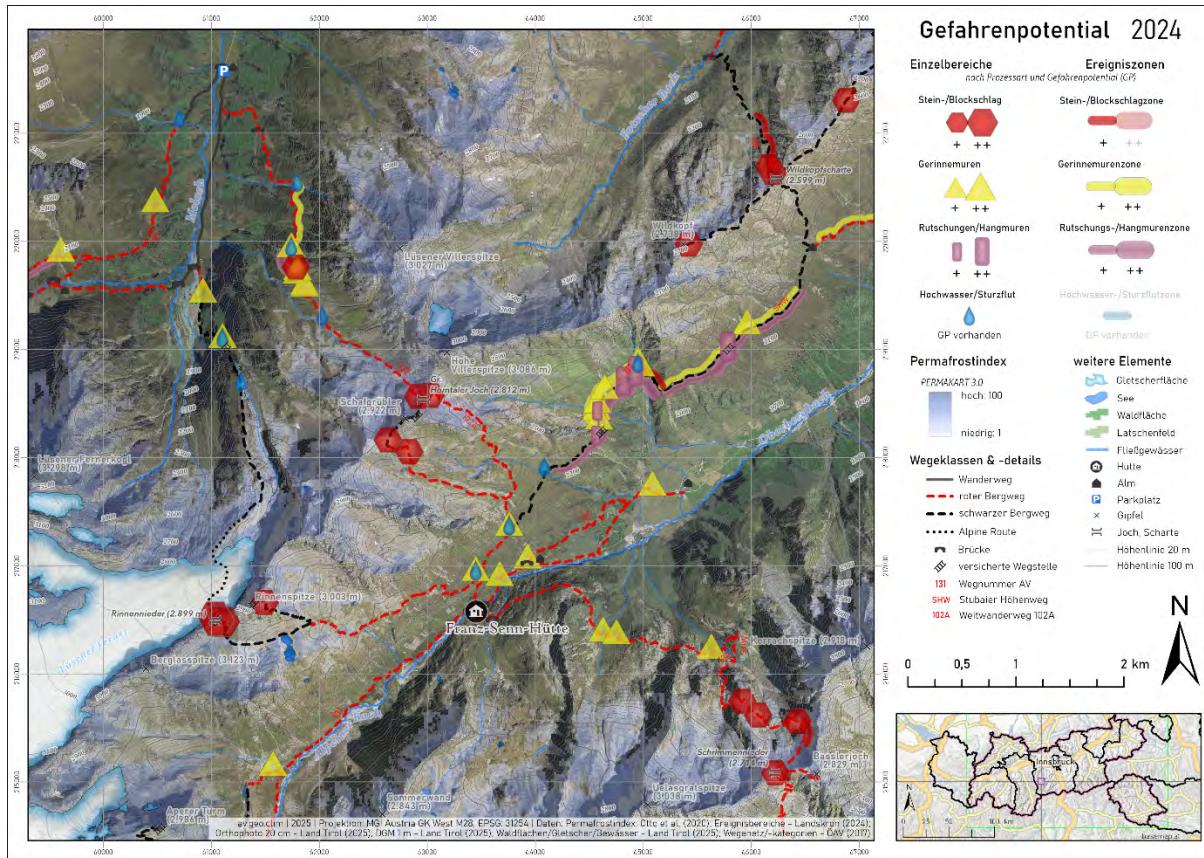


Abb. G-21: Gefahrenpotentialkarte der Pilotregion für das Jahr 2024. Dargestellt sind Wegabschnitte, die durch gravitative Sturz-, Fließ-, und Gleitprozesse sowie fluviatile Prozessdynamiken gefährdet werden. Wiedergegeben werden ausschließlich Ereignisse, welche ein hohes (+) oder sehr hohes (++) Gefahrenpotential aufweisen. Unterschieden wird zudem zwischen Einzelbereichen und Ereigniszonen. In der Legende stark transparent dargestellte Einträge kennzeichnen prinzipiell mögliche, jedoch in der Pilotregion nicht vorkommende Prozessausmaße.

Die Gefahrenstellen durch Sturzprozesse konzentrieren sich überwiegend in höheren Lagen (alpine und subalpine Höhenstufen), insbesondere im Bereich von Gipfeln, Graten und Scharten. Diese Häufung ist einerseits auf eine erhöhte Disposition infolge geologischer Störzonen und das dortige Vorhandensein großer exponierter Felsflächen, die verstärkt Witterungseinflüssen ausgesetzt sind, zurückzuführen. Zudem ist die hohe Disposition durch die Wechselwirkungen zwischen Terrain und Gletscher- bzw. Permafrostrückgang bedingt. Andererseits spielt die gefahrensteigernde geographische Beziehung zwischen Anbruchgebiet, Transitbereich und Weg eine wesentliche Rolle: Steile, hindernisarme Hangstrukturen begünstigen das Erreichen des Weges durch fallendes Material und schränken die Möglichkeiten für Ausweichmanöver stark ein. Weitere Gefahrenbereiche entstehen häufig dort, wo Anbruchstellen mit hoher Grunddisposition in unmittelbarer Nähe des Weges liegen.

Gerinnemuren mit hohem Gefahrenpotential entstehen im Gebiet vorrangig an höher gelegenen Standorten an den Bergflanken und betreffen daher primär die Wanderinfrastruktur der mittleren (subalpinen) Höhenstufe. Ihre Disposition steht damit im Zusammenhang mit dem klimawandelbedingten Rückgang von Gletschern und Permafrost sowie mit dem Auftreten intensivierender Prozessketten. Auswirkungen davon können auch tiefergelegene Auslaufbereiche und damit Talregionen betreffen.

Für das Wegenetz relevante Rutschungen und Hangmuren sind hauptsächlich im subalpinen Bereich lokalisiert. Hier führen eine ungünstige Kombination aus lockeren, vegetationsarmen Bodenschichten und mittleren bis steilen Hangneigungen zu einer erhöhten Disposition. Gleichzeitig begünstigt ein hoher Felsdurchsatz die Ausbildung potentieller Gleitflächen. In Kombination mit den zuvor genannten Faktoren kann es zu Komplikationen beim Be- bzw. Umgehen führen. Ein signifikantes Gefahrenpotential besteht auch in Gebieten mit einer starken Bodendurchfeuchtung, verursacht durch konkave Reliefstrukturen. Ein weiterer Aspekt betrifft den Einfluss von nivalen (und generell auch glazialen) Schmelzvorgängen in unmittelbarer Nähe zur Infrastruktur, wodurch Ereignisse begünstigt werden. Fluviale Gefahrenbereiche konzentrieren sich primär auf Gerinnequerungen im subalpinen Raum. Sie betreffen vor allem Ereignisse, bei denen durch hohe Abflussmengen und erosive Prozesse die betroffenen Wegstellen temporär unpassierbar oder erschwert begehbar werden. Eine erhöhte Gefahr durch glazial gespeiste Schmelzprozesse konnte im Untersuchungsgebiet nicht identifiziert werden, ist jedoch prinzipiell zu berücksichtigen. Während der Schneeschmelze kann es aufgrund hochgelegener Einzugsgebiete zu verstärktem Prozessaufreten kommen. Ausschlaggebend für das tatsächliche Gefahrenpotential ist hier meist nicht die Prozessausprägung selbst, sondern das Fehlen oder der mangelhafte Zustand gerinnequerender Infrastruktur wie Brücken oder Stege.

Die in der Pilotregion identifizierten Gefahrenstellen erscheinen grundsätzlich plausibel und decken sich mit ähnlichen Forschungsergebnissen, wie in etwa dem von Lieb et al. (2010). Ob sich die Projektergebnisse auch auf andere Gebirgsräume übertragen lassen, kann nur durch eine gebietsübergreifende Validierungsstudie verlässlich beurteilt werden. Ebenso bedarf es einer genaueren Analyse jener Bereiche, die zwar erfasst, aufgrund ihrer niedrigeren Gefahrenpotentialeinstufung jedoch nicht in der Karte dargestellt wurden.

In diesem Zusammenhang ist auch die Perspektive der Nutzer:innen von besonderem Interesse. Es besteht die Gefahr, dass Abschnitte ohne ausgewiesene Gefahrenstellen fälschlicherweise als gefahrenfrei interpretiert werden könnten. Umgekehrt dürfen ausgewiesene Gefahrenbereiche nicht zu einer übermäßigen Verunsicherung führen. Ziel ist vielmehr eine sachliche Information über den aktuellen Zustand, wofür eine ausgereifte und zielgruppengerechte Kommunikationsstrategie essentiell ist. Dies wird mithilfe einer Verknüpfung zu den StoryMaps (Kap. G-7.6 und G-9.4) erreicht.

Der aktuell gewählte Maßstab erlaubt eine erste Einschätzung räumlicher Muster, reicht jedoch nicht aus, um wichtige Gefahrenstellen für die Tourenplanung präzise lokalisieren. Dieses Defizit ließe sich künftig durch eine maßstabsunabhängige, interaktive Onlinekarte beheben – vorausgesetzt, es stehen ausreichend überregionale Datensätze zur Verfügung. Trotz dessen ist in der aktuellen Ansicht bereits erkennbar, in welchen Lagen und Wegbereichen mit einem vermehrten Aufkommen der prozessspezifischen Gefahrenstellen zu rechnen ist.

2045

Der Wissenstransfer an bestimmte Akteursgruppen stellt ein entscheidendes Ziel des Projekts dar. Um auch fachfremden Personen potentielle Veränderungen in der Gefährdungssituation alpiner Wanderwege durch Naturraumprozessen zu verdeutlichen und somit die Auswirkungen des Klimawandels anhand eines konkreten Beispiels nachvollziehbar zu machen, wurde die Projektmethode auf ein zukünftiges Szenario für das Jahr 2045 übertragen.

Vor dem Hintergrund der in Kapitel G-5.3.1 beschriebenen Klimaprognosen ergeben sich für das Szenario zum Jahr 2045 Veränderungen in Häufigkeit und Verteilung der untersuchten Gefahrenstellen (Abb. G-22): Gefahrenbereiche durch Gerinnemuren nehmen zu, bedingt durch eine höhere Disposition infolge intensiverer Schnee- und Gletscherschmelze sowie veränderter Bedingungen in den Anbruchzonen. Ein ähnlicher Trend zeigt sich auch bei Rutschungen und Hangmuren. Die Kombination aus intensivierter Schmelzvorgänge und konzentrierter auftretenden Starkniederschlägen führt zudem zu einer leichten Zunahme fluvialer Gefahrenstellen. Gravitative Sturzprozesse verlagern sich tendenziell in höhere Lagen. In der Pilotregion führt dies jedoch nur zu geringfügigen Veränderungen, da sich die signifikanten Hauptgefahrenbereiche im Jahr 2045 gleichfalls dem gegenwärtigen Zustand in der sensiblen Permafrost-Übergangszone konzentrieren. Erst in weiter entfernten Zeithorizonten ist

hier mit einem sukzessiven Rückgang der Prozessaktivität zu rechnen. Dabei ist auch festzuhalten, dass manche Felsbereiche wie größere, exponiert und in großer Höhe gelegene Anbruchgebiete mit geringen Gesteinsfestigkeiten auch ohne den Zusatzfaktor Klimawandel eine hohe Prozessaktivität und damit einhergehend ein hohes Gefahrenpotential aufweisen.

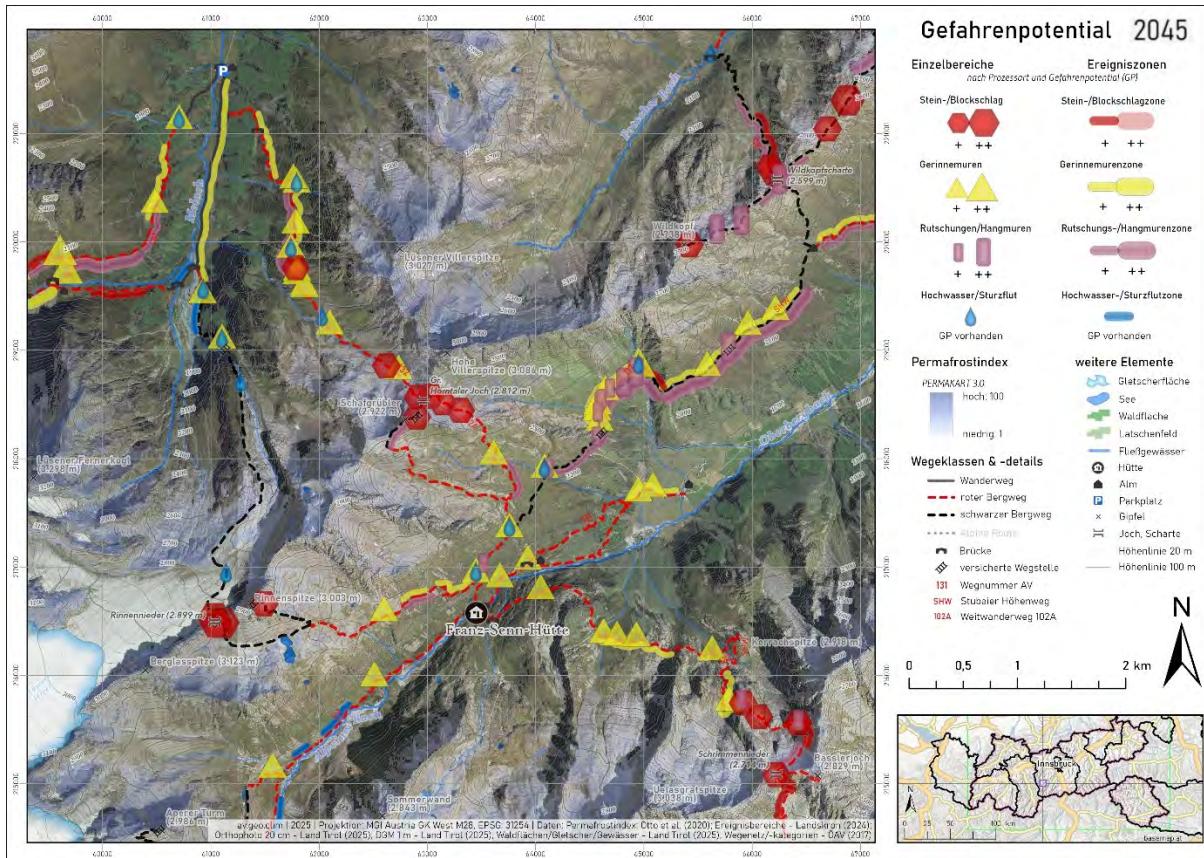


Abb. G-22: Für illustrative Zwecke entwickelte hypothetische Gefahrenpotentialkarte für das Jahr 2045. Unter dem Aspekt zukünftig veränderter Bedingungen durch die Klimaerwärmung wurden die untersuchten Ereignisbereiche neu bewertet, was in neuen Ausprägungen in Auftreten und Gefahrenpotential resultiert. Die Originaldaten wurden teilweise manipuliert.

Im Vergleich zur aktuellen Gefahrenpotentialkarte zeigt sich damit eine Zunahme potentiell gefährdeter Wegabschnitte. Dies steht im Einklang mit der prognostizierten Intensivierung der Prozesse, die mit größeren Magnituden einhergeht und damit ein erhöhtes Gefahrenpotential für das Wegenetz impliziert. Dass Extremereignisse seltener auftreten als kleinere, weniger gefährliche Ereignisse, bleibt in der vorliegenden Darstellung jedoch unberücksichtigt. Da es sich hierbei ausdrücklich um ein illustratives Schaubild handelt, das zwar auf aktuellen Forschungsergebnissen, jedoch nicht auf wissenschaftlich replizierbaren Grundlagen basiert, ist dieser Aspekt in diesem Zusammenhang nachrangig. Das übergeordnete Ziel – ein breites Publikum für zukünftige klimabedingte Veränderungen im Kontext alpiner Naturgefahren entlang des Wander- und Bergwegenetzes zu sensibilisieren – kann durch diese visuelle Aufbereitung dennoch erreicht werden.

G-9.4 StoryMaps

Für das Ziel, einen Wissenstransfer zu den zentralen Themen des Projekts – Wandern, Naturgefahren und deren klimabedingte Veränderungen entlang des alpinen Wegenetzes – herzustellen, wurde eine weitere Kommunikationsmethode eingerichtet. Um eine breite Öffentlichkeit für die Thematik zu sensibilisieren und langfristig zur Erhöhung der Sicherheit im Gebirge beizutragen, wurden zwei interaktive Webseiten mithilfe von ArcGIS StoryMaps erstellt.

In 'Grundlagen zum alpinen Wandern im Klimawandel - Basiswissen für Planung und Praxis' erfahren Leser:innen mehr über essentielle Faktoren bei der Tourenplanung und der Zusammensetzung der Ausrüstung. Des Weiteren erhalten sie Informationen über die unterschiedlichen Voraussetzungen der Wander- und Bergwegekategorien oder zur Beschilderung. Auch wird darauf hingeführt, dass beim Aufenthalt im Gebirge immer mit Naturgefahren zu rechnen ist. Grundlagen und genauere Inhalte dazu sowie klimabedingte Veränderungen werden hingegen in der zweiten, weiterführenden StoryMap 'Naturgefahren entlang von Wanderwegen' vermittelt.

Neben der intendierten Sensibilisierung zeigen die beiden StoryMaps exemplarisch auf, wie eine zielgruppengerechte Ansprache der Öffentlichkeit durch geeignete akteursangepasste inhaltliche Aufbereitung und Vermittlung erreicht werden kann. Obwohl die Inhalte grundsätzlich für alle Interessierten zugänglich sind, richten sich diese Seiten primär an Wanderneulinge und weniger erfahrene Freizeit- und Bergsportler:innen. Entsprechend wurde auf eine niederschwellige, zugleich aber inhaltlich fundierte Formulierung geachtet. Eigens entwickelte Grafiken und Animationen (Abb. G-17 & G-23), welche neben den jeweiligen Textblöcken platziert wurden, unterstützen dabei das Verständnis visuell. Die beiden StoryMaps bauen zudem inhaltlich aufeinander auf und folgen einem sequenziellen roten Faden: von der Tourenplanung bis hin zu den Naturgefahren und deren klimabedingten Veränderung entlang des Weges. Interaktive Komponenten wie eine Map-Tour (Abb. G-23) ermöglichen es Nutzer:innen, markierte Punkte auf einer bedienbaren Karte schrittweise zu erkunden und so Inhalte unmittelbar im jeweiligen topographischen Kontext zu erfassen. Darüber hinaus wurde ein interaktiver Map-Slider integriert, der einen Vergleich der aktuellen Gefahrenpotentialkarte mit einer hypothetischen Zukunftsversion für das Jahr 2045 ermöglicht (vgl. Kap. G-9.3). Derartige interaktive Elemente fördern die aktive Auseinandersetzung mit den Inhalten und stärken das Verständnis für räumliche Zusammenhänge und Gefahrenkontakte.

Ergänzend dazu wurde eine dritte, eigenständige Seite mit Informationen zum Projekt realisiert, auf der das Gesamtvorhaben, Ablauf, die Hintergründe und Ziele sowie das Projektteam vorgestellt werden.

Die modulare Struktur der StoryMaps eignet sich darüber hinaus für künftig geplante Erweiterungen, etwa zur adressatengerechten Ansprache anderer Akteur:innen wie beispielsweise erfahrene Wander:innen. Insgesamt zeigen die StoryMaps, wie digitale Werkzeuge in der Wissensvermittlung zu alpinen Risiken wirksam eingesetzt werden können – ein Ansatz, der auch über das Projekt hinaus Potential für nachhaltige Bildungsarbeit bietet.

Die StoryMaps sind erreichbar unter: av-geo-clim-unibk.hub.arcgis.com [21.06.2025].

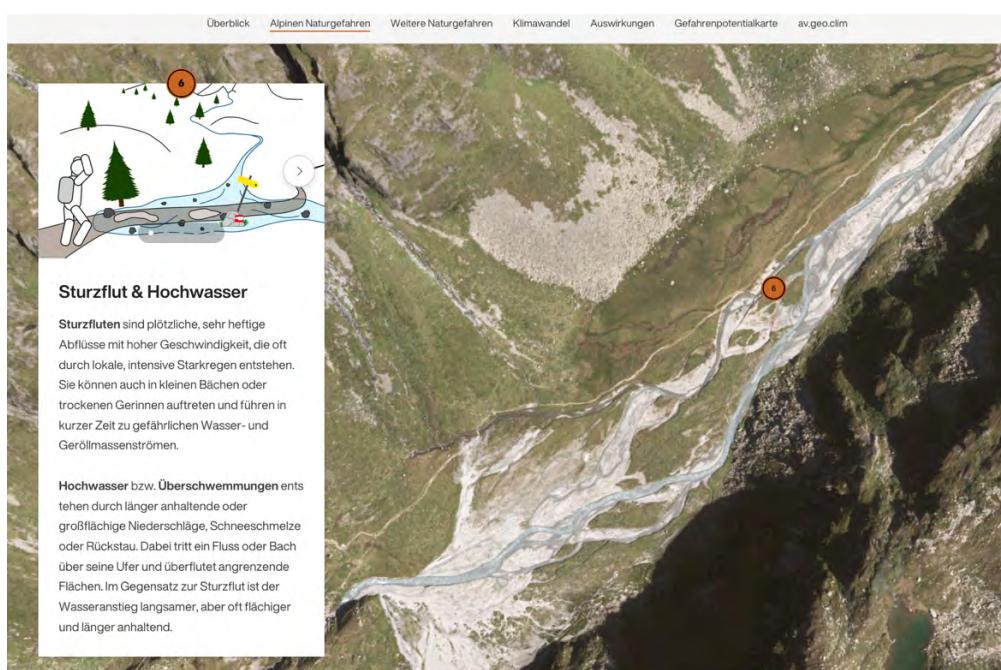


Abb. G-23: Bildschirmaufnahme der Map-Tour aus der StoryMap zu alpinen Naturgefahren.

G-10 Fazit und Ausblick

Das vorliegende Projekt leistet einen Beitrag zur Auseinandersetzung mit der Naturgefahrenlage und mit der Nutzung von Wander- und Bergwegen. Die Inhalte formen sich zu einer Methode, welche in der Problematik der steigenden Risiko- und Gefahrensituationen in Gebirgslagen für eine Vielzahl von Nutzergruppen an einer entscheidenden Stelle intervenieren kann: In Form einer Gefahrenprävention durch Information und Sensibilisierung. Die entwickelten Produkte ergeben die Möglichkeit, an ebendieser Stelle zielgerichtet zu wirken. Gerade hinsichtlich der Aktualität der Thematik ist eine zeitnahe Umsetzung der entwickelten und diskutierten Projektinhalte von großer Bedeutung. Um einen größtmöglichen Nutzen aus dem Produkt ziehen zu können, ist jedoch eine Bereitschaft für stetige Aktualisierungen, Erweiterungen und Verbesserungen vonnöten. Dies konstituiert die Rahmenbedingungen für den Einsatz in der Praxis und ermöglicht eine zweckmäßige Reaktion auf die Situation im Wanderwesen.

Mit dem entwickelten digitalen Survey wurde eine praxistaugliche und anwendungsorientierte Grundlage zur standardisierten Erfassung naturgefahrenrelevanter Informationen entlang alpiner Wege zur Bewertung der Gefahrenstellen geschaffen. Die implementierten Hilfestellungen über Kurzinformationen tragen neben einer einheitlichen Datenerfassung auch zur Sensibilisierung bei.

Mithilfe der Bewertungspfade können Gefahrenstellen im Zusammenhang mit Naturgefahren einheitlich klassifiziert werden. Die dazu benötigten Daten werden direkt dem Survey entnommen und mit GIS-Informationen komplettiert. Zur Bewertung des Gefahrenpotentials wird eine Analyse der gefahrenerzeugenden Umgebungsfaktoren einer Wegstelle durchgeführt, welche sich aus einer Verschneidung der Eigenschaften der Naturgefahren und der Wegeverhältnisse zusammensetzen. Die Ergebnisse können direkt weiterverwendet werden und dienen als Grundlage zur Erstellung der Gefahrenpotentialkarten. Um die Bewertungspfade österreichweit anwendbar zu machen, ist aufgrund regionaler geologischer und topographischer Unterschiede eine Studie zum Adaptationsverfahren erforderlich. Da es sich dabei schlussendlich um kleinere Anpassungen und Erweiterungen handeln wird, ist eine baldige Umsetzung absehbar.

Die Gefahrenpotentialkarten geben wichtige, Naturgefahren ausgesetzte Wegstellen in einer intuitiven Art wieder und können dies auch unter Hinzunahme hypothetischer Annahmen für zukünftige Entwicklungen darstellen. Dabei sind - bei zukünftig vorhandenem Datenmaterial - die Einbindung in österreichweite Onlinenkarten und dynamische Aktualisierungen (z.B. die Selektion und Kennzeichnung bestimmter Ereignisse nach einem konvektiven Starkregenereignis) im Sinne eines eigenverantwortlich anwendbaren Frühwarn-/Informationssystems vorstellbar. Dabei soll es je nach Maßstabsebene möglich sein, die Gefahrenstellen exakt abzugrenzen, Zusatzinformationen anzuzeigen oder detaillierte Erklärmaterialien durch die StoryMaps bereitzustellen.

Die StoryMaps stellen einen niederschwülligen Zugang zu generellen, wanderbezogenen Themen, aber auch zu erweiterten und vertiefenden Informationen dar. Insbesondere durch diese themenkombinierte und schrittweise Bereitstellung von Information können die Empfänger:innengruppen der Laien gut erreicht und für die wichtige Thematik sensibilisiert werden. Verknüpft mit den anderen Projektmethoden kann damit ein zielgruppenspezifischer und umfassender Wissenstransfer vollzogen werden, der auf die heterogenen Anforderungen und Kompetenzen der Nutzer:innengruppen eingeht.

Der durchgeführte Expert:innenworkshop lieferte vielfältiges Feedback sowie zahlreiche Anregungen für konstruktive Weiterentwicklungsmöglichkeiten. Im Verlauf des Projekts konnten einige davon bereits sinnvoll integriert werden.

Mit Abschluss des Projekts geht die entwickelte Methode in eine erste Testphase über. Auf Grundlage der Rückmeldungen aus der Praxis sollen die Tools fortlaufend weiterentwickelt und an die Anforderungen der Nutzer:innen angepasst werden. Ob die angestrebten Effekte der Informations- und Sensibilisierungsmaßnahmen tatsächlich eintreten, wird davon abhängen, inwieweit die entwickelten Methoden Verbreitung finden und von den jeweiligen Nutzer:innengruppen angenommen werden.

Zusätzlich stehen zwei Entwicklungsschwerpunkte im Fokus: Zum einen soll die bislang manuelle Bewertung der mittels Survey erfassten Daten anhand der definierten Pfade schrittweise automatisiert werden, idealerweise bis hin zur (teil-)automatisierten Erstellung der Gefahrenpotentialkarten.

Zum anderen ist die Anwendung der Methode auf weitere alpine Regionen ein angestrebter Schritt. Dafür ist zunächst eine breite Erprobung in weiteren geographischen, klimatischen und infrastrukturellen Kontexten notwendig, um das System langfristig zu 'eichen' und seine Übertragbarkeit zu gewährleisten. Im Zuge dessen können auch weitere Naturgefahren wie z.B. Altschneefelder oder spezifische Waldgefahren ihren Weg in die Methodik finden.

Langfristig ist auch eine gezielte Erweiterung des Nutzer:innenkreises denkbar. So könnte der digitale Survey nach entsprechender fachlicher Schulung perspektivisch auch für erfahrene Alpinist:innen oder fachlich versierte Wandernde geöffnet werden. Dadurch ließe sich nicht nur die Datengrundlage verbreitern, sondern zugleich auch das Risikobewusstsein innerhalb der wander- und bergsportaffinen Zivilgesellschaft weiter stärken.

Ein nächster Entwicklungsschritt betrifft die Weiterentwicklung und Ausdifferenzierung des bestehenden StoryMaps Prototypen. Künftig soll dieser eine breite Palette an Inhalten vermitteln, die gezielt auf die Bedürfnisse der unterschiedlichen Akteursgruppen zugeschnitten ist. Darüber hinaus ist der Einsatz der StoryMap auch als ergänzendes, direkt verlinkbares Informationsmedium – etwa im Kontext der Gefahrenpotentialkarten – konzeptionell vorgesehen.

Ergänzend zur wissenschaftlichen Kommunikation erscheint die Umsetzung eines thematischen Lehrpfads als vielversprechender Ansatz. Dabei könnten Infotafeln entlang eines Wanderweges zum selbstgesteuerten Lernen anregen. An Tafeln angebrachte QR-Codes könnten direkt mit weiterführenden Informationen, etwa die StoryMaps, verlinkt werden. Mit diesem Format könnte man das Bewusstsein für Naturgefahren und klimabedingte Veränderungen direkt im betroffenen Gelände in das persönliche Bergerlebnis einbetten und dadurch weiter stärken.

Das Projekt lässt sich in seinen vielschichtigen inhaltlichen, methodischen und zeitlichen Dimensionen mit den folgenden Kernbotschaften zusammenfassen:

1. Die aktuelle Situation im Gebirge wird sich durch die Intensivierung alpiner Naturgefahren infolge des Klimawandels sowie durch absehbare soziologische Entwicklungen zunehmend verschärfen.
2. Diese Problematik erfordert eine gezielte Intervention mit dem Ziel, Gefahrensituationen und damit Schäden präventiv durch zielgerichteten Wissenstransfer und Sensibilisierung der verschiedenen Nutzer:innen zu reduzieren.
3. Ineinandergreifende und partizipative Methoden, wie sie im Projekt entwickelt wurden – darunter ein digitaler Survey zur Datenaufnahme im Gelände, prozessspezifische Bewertungspfade, verständliche Gefahrenpotentialkarten und akteursgruppengerichtete StoryMaps – sollen zur Anwendung kommen, um sich dem angestrebten Ziel anzunähern.

Die Produkte sollen nun auf zumindest nationaler Ebene zur Anwendung kommen. Ziel ist es, die entwickelten Werkzeuge dabei so einzusetzen und weiterzuentwickeln, dass sie künftig nicht nur eine verlässliche Grundlage für Tourenplanungen bilden, sondern auch durch gezielte Sensibilisierung aller Nutzer:innen zur Erhöhung der Sicherheit entlang des alpinen Wegenetzes beitragen. Dieser Anspruch bleibt über das Projektende hinaus bestehen und wird aktiv weiterverfolgt.

G-11 Literaturverzeichnis

- Achleitner, S., Kohl, B., Lumassegger, S., Huber, A., Formayer, H., & Weingraber, F. (2020).** Sturzfluten. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 247–285.
- Austrian Panel on Climate Change (APCC) (2025).** Physical and ecological manifestation of climate change in Austria. In Second Austrian Assessment Report on Climate Change (AAR2), 1-82.
- Bast, A., Ortner, G., & Bründl, M. (2020).** Sicher Wandern 2040: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Wanderwegwesen. Eine Literatursynthese. Davos.
- Beniston, M., Stoffel, M., & Hill, M. (2011).** Impacts of climatic change on water and natural hazards in the Alps: Can current water governance cope with future challenges? Examples from the European 'ACQWA' project. Environmental Science and Policy, 14(7), 734-743.
- Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., Fantini, A., Giacoma, F., Hauck, C., Huss, M., Huwald, H., Lehning, M., López-Moreno, J.-I., Magnusson, J., Marty, C., Morán-Tejeda, E., Morin, S., Naaim, M., Provenzale, A., Rabatel, A., Six, D., Stötter, J., Strasser, U., Terzaghi, S., & Vincent, C. (2018).** The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. The Cryosphere, 12(2), 759-794.
- Blöschl, G. (2020).** Hochwasser. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 229–246.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (2016).** Schutz vor Massenbewegungsgefahren: Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bern.
- Braun, F. (2009).** Sommer-Bergtourismus im Klimawandel: Szenarien und Handlungsbedarf am Beispiel des hochalpinen Wegenetzes. [Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien].
- Carpignano, A., Golia, E., Di Mauro, C., Bouchon, S., & Nordvik, J. (2009).** A methodological approach for the definition of multi-risk maps at regional level: first application. Journal of Risk Research, 12(3–4), 513–534.
- Chimani, B., Heinrich, G., Hofstätter, M., Kerschbaumer, M., Kienberger, S., Leuprecht, A., Lexer, A., Peßenteiner, S., Poetsch, M. S., Salzmann, M., Speckermann, R., Switanek, M., & Truhetz, H. (2016).** Endbericht ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten–Methoden–Klimaanalyse. Wien.
- Climate Change Centre Austria (CCCA) (2023).** Klimastatusbericht Österreich 2022, Wien.
- Climate Change Centre Austria (CCCA) (2024).** Klimastatusbericht Österreich 2023, Wien.
- Crozier, M. J. (2010).** Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. Geomorphology, 124(3-4), 260-267.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996).** Landslide types and processes. Transportation Research Board, 247 (Special Report), 36–75.
- Deline, P., Chiarle, M., Curtaz, M., Kellerer-Pirklbauer, A., Lieb, G. K., Mayr, V., Mortara, G., & Ravanel, L. (2011).** Rockfalls. Hazards related to permafrost and to permafrost degradation, PermaNET project: State-of-the-art report 6.2, 67–105.
- Deutscher Alpenverein (DAV) & Österreichischer Alpenverein (ÖAV) (2016).** Wegehandbuch des Alpenvereins. URL: https://www.alpenverein.at/portal_wAssets/docs/bergaktiv/wege_touren/wegehandbuch_digital.pdf [16.04.2025].
- Frey, H., & Haeberli, W. (2020).** Risiken durch Gletscherseen im Klimawandel. In J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, et al. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Hochgebirge im Wandel, 336–342.

- Gärtner-Roer, I., & Bast, A. (2019).** (Ground) ice in the proglacial zone. Geomorphology of Proglacial Systems: Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes, 85-98.
- Geologische Bundesanstalt (GBA) (2011).** Geofast 147 Axams, 1:50.000. Wien.
- Gertsch, E. (2009).** Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Großereignissen. Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. [Dissertation, Universität Bern].
- Glade, T. (2020).** Klimawandel, Morphodynamik und gravitative Massenbewegungen. In J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, et al. (Hrsg.), Warnsignal Klima: Hochgebirge im Wandel, 304-309.
- Glade, T., Tilch, N., & Koçiu, A. (2020).** Extreme bei Hangrutschungen und Hangmuren. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 461–487.
- Glade, T., & Zangerl, C. (2020).** Gravitative Massenbewegungen – Terminologie und Charakteristika. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 367–382.
- Günzel, F., & Haeberli, W. (2020).** Einfluss der Permafrostdegradation auf Hangstabilität. In J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, et al. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Hochgebirge im Wandel, 310-316.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014).** 21st century climate change in the European Alps – A review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138–1151.
- Hählen, N., Hitz, O., & Stoffel, D. (2016).** Umgang mit Gletscherhochwasser im Berner Oberland. INTERPRAEVENT 2016 – Conference Proceedings, 553-560.
- Hinderling, B., Marty, P., Gwerder, S., Truttmann, M., & Hunziker, R. (2021a).** Sicher Wandern 2040 - Teilbericht 1: Übersicht und Grundlagen zu Projekt und Resultaten. Bern.
- Hinderling, B., Marty, P., Gwerder, S., Truttmann, M., & Hunziker, R. (2021b).** Sicher Wandern 2040 - Teilbericht 2: Anwendungsorientiertes Ergebnisraster. Bern.
- Hohenwallner, D., Becsi, B., Formayer, H., Huber, H., Lehr, C., Prutsch, A., & Zebisch, M (2018).** Climate change impact maps for Austrian regions. Endbericht zum Projekt CLIMA-MAP, gefördert durch den Klima- und Energiefonds im Rahmen des Programms 'Austrian Climate Research Programme' (ACRP). Wien.
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014).** The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023).** Synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6), Longer report. IPCC Genf, Schweiz.
- Jacquemart, M., Weber, S., Chiarle, M., Chmiel, M., Cicora, A., Corona, C., Eckert, N., Gaume, J., Giacoma, F., Hirschberg, J., Kaitna, R., Magnin, F., Mayer, S., Moos, C., van Herwijnen, A., & Stoffel, M. (2024).** Detecting the impact of climate change on alpine mass movements in observational records from the European Alps. *Earth-Science Reviews*, 258.
- Kaitna, R., Prenner, D., & Hübl, J. (2020).** Muren. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 489–510.
- Kienholz, H. (2005).** Analyse und Bewertung alpiner Naturgefahren: eine Daueraufgabe im Rahmen des integralen Risikomanagements. *Geographica Helvetica*, 60(1), 3–15.
- Kotlarski, S., Gobiet, A., Morin, S., Olefs, M., Rajczak, J., & Samacoïts, R. (2023).** 21st Century alpine climate change. *Climate Dynamics*, 60(1), 65-86.
- Krautblatter, M., Funk, D., & Günzel, F. K. (2013).** Why permafrost rocks become unstable: a rock ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 876-887.

Landskron, S. (2024). Analyse und Beurteilung sommerlicher Naturgefahren in Bezug auf Wanderwege im Bereich der Franz-Senn-Hütte, Stubaier Alpen, Tirol. [Masterarbeit, Universität Innsbruck].

Lehmann, C. (1993). Zur Abschätzung der Feststofffracht in Wildbächen. Grundlagen und Anwendung. Geographica Bernensia, G42.

Lieb, G. K., & Kellerer-Pirkbauer, A. (2025). Sammelbericht über die Gletschermessungen des Österreichischen Alpenvereins im Jahr 2024. Bergauf 150(80), 13–19.

Lieb, G. K., Kern, K., & Seier, G. (2010). AlpinRiskGP – Abschätzung des derzeitigen und zukünftigen Gefährdungspotentials für Alpintouristinnen/-touristen und Infrastruktur bedingt durch Gletscherrückgang und Permafrostveränderung im Großglockner Pasterzengebiet (Hohe Tauern, Österreich). Endbericht von StartClim2009.F. In StartClim2009: Anpassung an den Klimawandel: Beiträge zur Erstellung einer Anpassungsstrategie für Österreich, 1–50.

Lindell, M. K. (2020). Improving hazard map comprehension for protective action decision making. Frontiers in Computer Science, 2, 27.

Mamot, P., Weber, S., Eppinger, S., & Krautblatter, M. (2021). A temperature-dependent mechanical model to assess the stability of degrading permafrost rock slopes. Earth Surface Dynamics, 9(5), 1125–1151.

Mergili, M., & Glade, T. (2020). Synthese. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 31–42.

Moser, M., Janu, S., & Mehlhorn, S. (2016). Critical Rainfall Conditions Triggering Shallow Landslides or Debris Flows in Torrents - Analysis of Debris Flow events 2012, 2013 and 2014 in Austria. INTERPRAEVENT 2016 – Conference Proceedings, 370–378.

Nötzli, J., & Gruber, S. (2005). Alpiner Permafrost – ein Überblick. Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt, 70, 111–121.

Noetzli, J., Isaksen, K., Barnett, J., Christiansen, H. H., Delaloye, R., Etzelmüller, B., Farinotti, D., Gallemann, T., Guglielmin, M., Hauck, C., Hilbich, C., Hoelze, M., Lambiel, C., Magnin, F., Oliva, M., Paro, L., Pogliotti, P., Riedl, C., Schoeneich, P., Valt, M., Vieli, A., & Phillips, M. (2024). Enhanced warming of European mountain permafrost in the early 21st century. Nature Communications, 15(1), 1–15.

Olefs, M., Formayer, H., Gobiet, A., Marke, T., Schöner, W., Fischer, A., & Aigner, G. (2021). Klimawandel – Auswirkungen mit Blick auf den Tourismus. In U. Pröbstl-Haider, D. Lund-Durlacher, M. Olefs, & F. Pretenthaler (Hrsg.), Tourismus und Klimawandel, Springer Spektrum, 19–46.

Otto, J.-C., Krautblatter, M., & Sattler, K. (2020a). Permafrostgefahren. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 537–562.

Otto, J. C., Schrott, L., & Keller, F. (2020b). Map of permafrost distribution for Austria, Europe. URL: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.917719> [22.01.25].

Pistotnik, G., Hofstätter, M., & Lexer, A. (2020). Starkniederschlag und Hagel. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 141–172.

Poisel, R. (2018). Felsstürze – Ablösemechanismen. Berichte der Geol. Bundesanstalt, 125, 49–58.

Preh, A., Mölk, M., & Illeditsch, M. (2020). Steinschlag und Felssturz. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 425–459.

Prettenthaler F., & Formayer, H. (2011). Tourismus im Klimawandel: Zur regionalwirtschaftlichen Bedeutung des Klimawandels für die österreichischen Tourismusgemeinden. Studien zum Klimawandel in Österreich, Band 6. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW), Wien.

Pröbstl, U., & Damm, B. (2009). Wahrnehmungen und Bewertungen von Naturgefahren als Folge von Gletscherschwund und Permafrostdegradation in Tourismus – Destinationen am Beispiel des Tuxer Tals (Zillertaler Alpen/Österreich). Endbericht von StartClim2008.F. In StartClim2008: Anpassung an den Klimawandel in Österreich, 1–50.

Pröbstl-Haider, U., Hödl, C., Ginner, K., Falk, M., Borgwardt, F., Formayer, H., Olefs, M., & Illing, K. (2021). Outdooraktivitäten und damit zusammenhängende Einrichtungen im Sommer und in den Übergangszeiten. In U. Pröbstl-Haider, D. Lund-Durlacher, M. Olefs, & F. Prettenthaler (Hrsg.), Tourismus und Klimawandel, Springer Spektrum, 123–156.

Rickenmann, D. (2014). Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen, WSL Berichte, 9, 108 S.

Rubel, F., Brugger, K., Haslinger, K., & Auer, I. (2017). The climate of the European Alps: Shift of very high resolution Köppen-Geiger climate zones 1800–2100. Meteorologische Zeitschrift, 26(2), 115–125.

Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Self-determination theory and the facilitation of intrinsic motivation, social development, and well-being. American psychologist, 55(1), 68.

Salim, E., Ravanel, L., Bourdeau, P., & Deline, P. (2021). Glacier tourism and climate change: effects, adaptations, and perspectives in the Alps. Regional Environmental Change, 21(4), 120.

Savi, S., Comiti, F., & Strecker, M. R. (2021). Pronounced increase in slope instability linked to global warming: A case study from the eastern European Alps. Earth Surface Processes and Landforms, 46(7), 1328–1347.

Schöner, W., & Haslinger, K. (2020). Extremtemperaturen und Trockenheit. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 77–96.

Stoffel, M., & Huggel, C. (2012). Effects of climate change on mass movements in mountain environments. Progress in Physical Geography, 36(3), 421–439.

Stoffel, M., Tiranti, D., & Huggel, C. (2014). Climate change impacts on mass movements—case studies from the European Alps. Science of the Total Environment, 493, 1255–1266.

Stoffel, M., Trappmann, D. G., Coullie, M. I., Ballesteros Cánovas, J. A., & Corona, C. (2024). Rockfall from an increasingly unstable mountain slope driven by climate warming. Nature Geoscience, 17(3), 249–254.

Strauss, P., & Schmaltz, E. M. (2020). Bodenerosion. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 343–363.

Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L. K. A., Gerber, W., & Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection – A review. Natural Hazards and Earth System Sciences, 11(9), 2617–2651.

Wiegand, C., & Geitner, C. (2010). Flachgründiger Abtrag auf Wiesen- und Weideflächen in den Alpen (Blaiken) – Wissensstand, Datenbasis und Forschungsbedarf. Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft, 152, 130–162.

Zischg, A., Mair, V., Lang, K., Deline, P., Ravanel, L., Schoeneich, P., & Kellerer-Pirklbauer, A. (2012). Consideration of permafrost and permafrost degradation in natural hazards assessment. INTERPRAEVENT 2012 – Conference Proceedings, 237–245.

G-12 Anhang

Dokumentation der wichtigsten Anwendungspunkte

Sicherheit geht vor!

Bitte achte bei der Erfassung immer auf deine eigene Sicherheit:

- Erfasse nur von **sicheren Standorten** aus.
- **Begib dich niemals in Gefahr**, um Angaben zu machen!

Was du benötigst:

- Ein **Smartphone** mit
 - **stabilen Internetverbindung** (Mobilfunk oder Hot-Spot)
 - **aktiver Verortung über GPS** (inkl. Standortfreigabe im Browser)

Hinweis:

Wenn du den "privaten Modus" oder "Inkognito-Modus" im Browser nutzt, funktioniert die automatische Standortfreigabe oft nicht! Du kannst dann deinen Standort **manuell auf einer Karte** eingeben.

Wie funktioniert die Erfassung?

- Die Erfassung dauert in der Regel 5 Minuten
- Du klickst auf den Link und das Formular öffnet sich im **Browser** deines Smartphones.
- **Wichtig:** Den Tab nicht schließen oder neu laden, sonst gehen deine Eingaben verloren!

Das Formular hat **6 Seiten** mit folgenden Themen:

1. **Wer?** (Vor- & Nachname)
2. **Wo?** (Ort der Beobachtung)
3. **Was? Wann?** (Art des Ereignisses)
4. **Gefahrenfaktoren im Prozess-Ausgangsgebiet?** (z. B. oberhalb des Weges)
5. **Gefahrenfaktoren im Prozessbereich/Wegnähe?** (z. B. direkt am oder auf dem Weg)
6. **Subjektive Eindrücke** (freiwillige Angaben wie Anmerkungen oder Foto)

Unterstützung beim Ausfüllen

Über das gesamte Formular verteilt findest du **Informationsfelder**, die dir weiterhelfen, falls du unsicher bist:

- Diese Felder erklären genauer, was gefragt wird, oder geben dir Hintergrundinfos zu Prozessen und Begriffen.
- **Die Infos sind anfangs eingeklappt** – du kannst sie durch **Antippen** öffnen.
- Wenn du diese Hilfestellungen später nicht mehr benötigst, kannst du sie **auf der ersten Seite ganz unten** für die gesamte Erfassung deaktivieren.

Abb. G-24: Anhang: Erste Seite der begleitenden Kurzdokumentation über die wichtigsten Anwendungspunkte des digitalen Erfassungsformulars.

Wichtige Hinweise zum Ausfüllen:

- Fragen mit **Sternchen (*)** sind **Pflichtangabefelder**.
→ Nur wenn alle beantwortet sind, kannst du zur nächsten Seite weitergehen.
- Es gibt verschiedene Arten von Fragen:
 - **Einfachauswahl** (eine Antwort auswählen)
 - **Mehrfachauswahl** (mehrere Antworten möglich)
 - **Freitextfelder** (Antwort frei eingeben)

Fotos erstellen (optional):

- Auf der letzten Seite kannst du optional ein Foto hochladen, **wenn besondere Bedingungen vorliegen**.
- **Achtung:** Das Hochladen eines Fotos benötigt
 - stabiles Internet
 - Datenvolumen deines Mobilfunkvertrags.

Bitte nur dann ein Foto hochladen, wenn es wirklich zusätzliche Informationen liefert!

Was passiert nach Abschluss?

- Nach dem Abschicken wird das Formular **nach ca. 3 Sekunden automatisch neu geladen**.
- Dein **Name wird gespeichert**, sodass du ihn bei der nächsten Erfassung nicht erneut eingeben musst.
- Wenn du **mehrere Gefahrenstellen oder Ereignisse** an einem Ort melden möchtest, bitte jeweils **ein neues Formular ausfüllen**.

Noch Fragen oder Probleme?

Wenn etwas nicht funktioniert (z. B. GPS), kannst du den Standort einfach **per Hand auf der Karte** eintragen.

Wichtig: Immer zuerst an die eigene Sicherheit denken!

Abb. G-25: Anhang: Zweite Seite der begleitenden Kurzdokumentation über die wichtigsten Anwendungspunkte des digitalen Erfassungsformulars.

Kurzanleitung zur Erfassung am Berg (ReadMe)

Was du brauchst

- Smartphone mit **Internet** und **GPS**
- **Browser** (z. B. Safari, Chrome)
- Standortfreigabe **aktivieren** (Achtung bei Inkognito-Modus → manuelle Eingabe möglich)

Sicherheit zuerst

- Nur von **sicheren Stellen erfassen!**
- Keine Gefahr eingehen!

Formular – Aufbau in 6 Schritten

1. Wer? (Name)
2. Wo? (Ort via GPS oder Karte)
3. Was? Wann? (Art des Ereignisses)
4. Gefahrenfaktoren im Prozess-Ausgangsgebiet
5. Gefahrenfaktoren im Prozessbereich/Wegnähe
6. Subjektive Eindrücke (freiwillig: Anmerkung, Foto)

Wichtige Hinweise

- Fragen mit * = Pflichtangaben
- Tab nicht schließen oder neu laden!
- Unterschiedliche Fragearten: Auswahl, Mehrfachauswahl, Freitext

Hilfefelder

- Infokästchen helfen dir bei Unsicherheiten
- Antippen zum Öffnen
- Auf Seite 1 ganz unten kannst du die Hilfe für alle Seiten deaktivieren

Foto-Upload (optional)

- Nur bei **besonderen Bedingungen**
- Braucht **stabiles Internet**
- Verbraucht **mobiles Datenvolumen**

Nach dem Absenden

- Formular lädt nach ca. 3 Sek. **neu**
- Name bleibt **gespeichert**
- Für mehrere Ereignisse bitte erneut ausfüllen

Probleme mit GPS?

→ Standort kann auch **manuell** auf der Karte eingegeben werden.

Danke für deinen Beitrag zur Sicherheit am Berg!

Abb. G-26: Anhang: Begleitendes Read-Me vor der Anwendung des digitalen Erfassungsformulars.

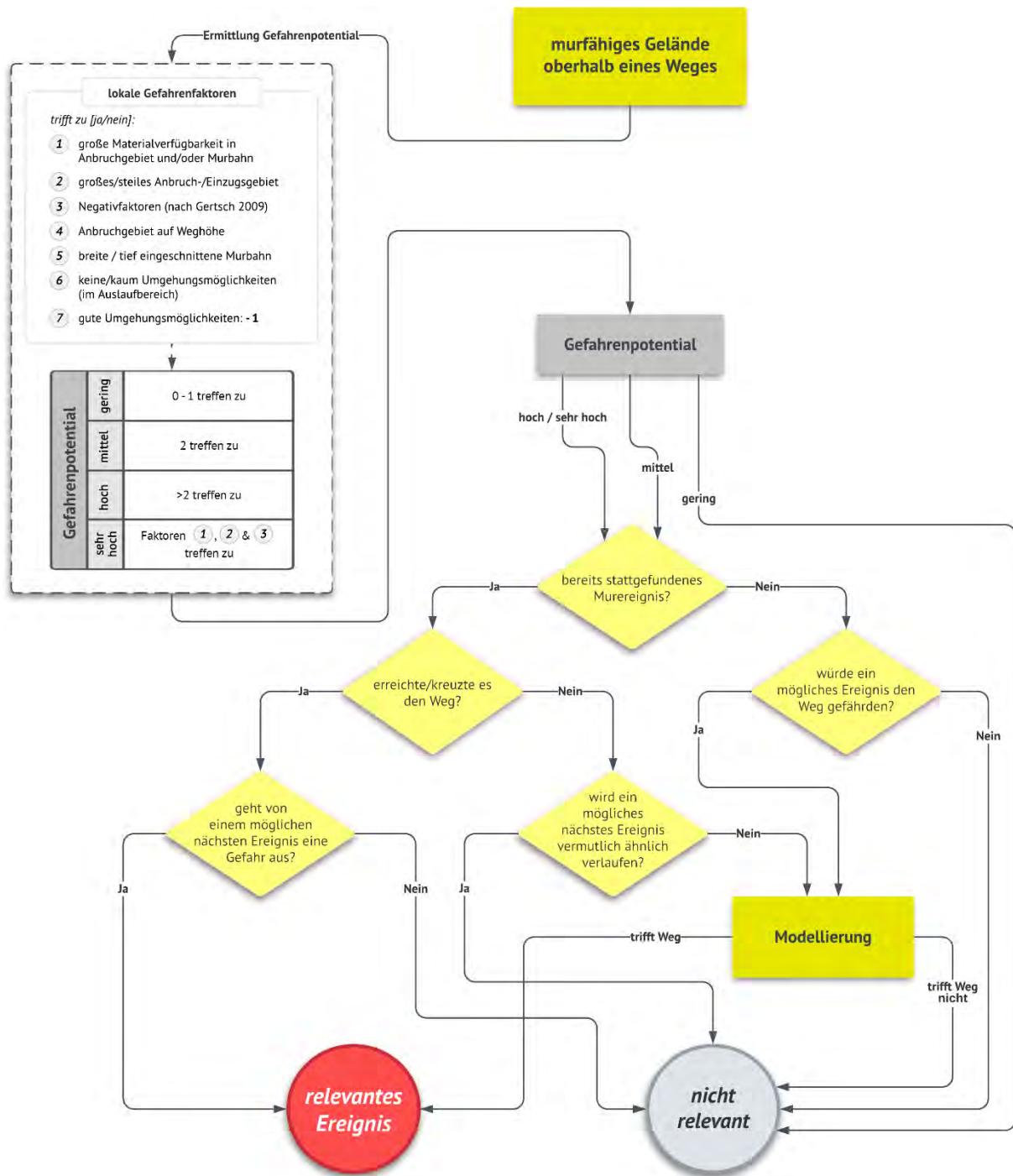


Abb. G-27: Anhang: Bewertungspfad für Gerinnemurenereignisse (verändert nach Landskron, 2024).

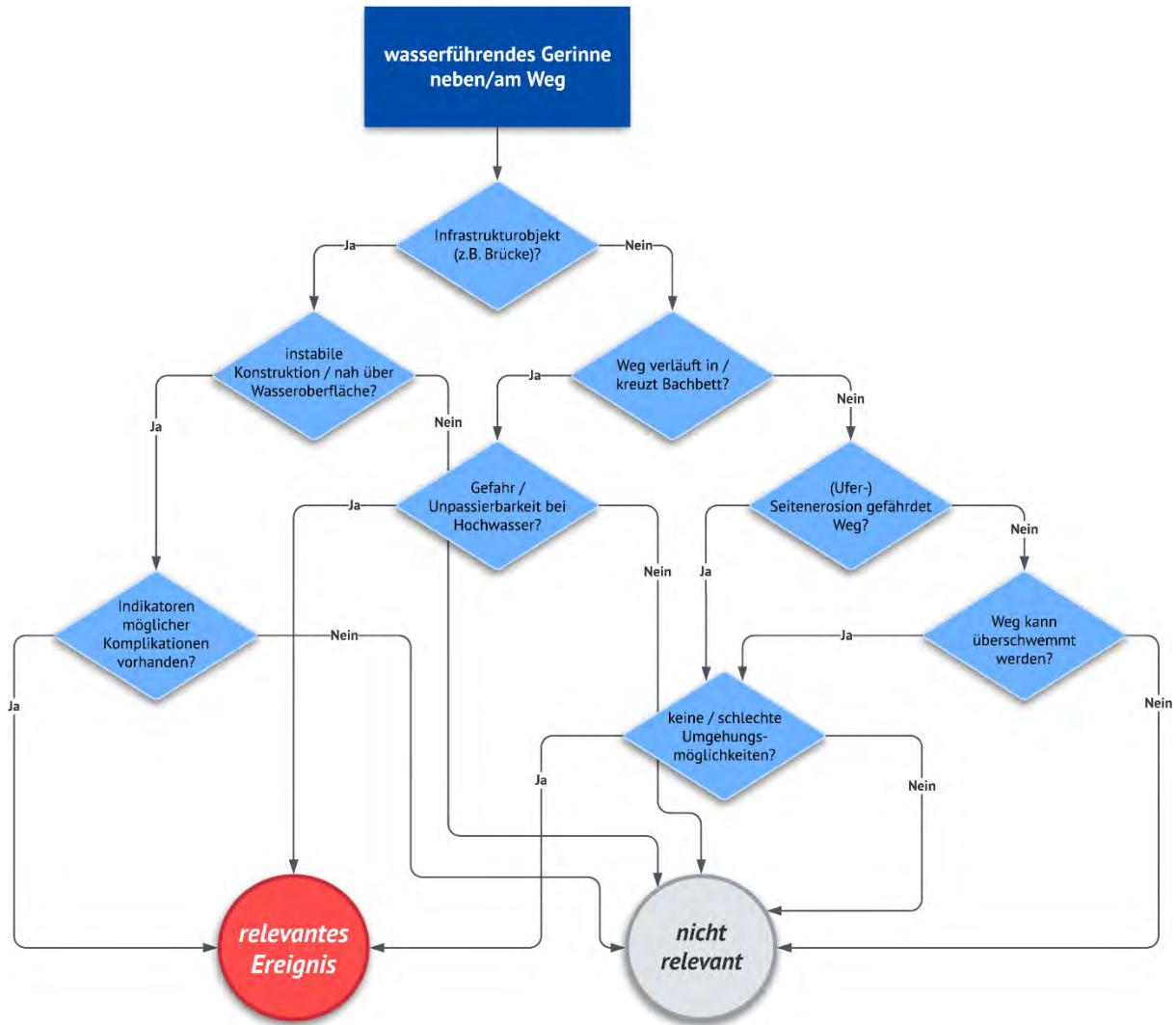


Abb. G-28: Anhang: Bewertungspfad für Hochwasser- und Sturzflutereignisse (verändert nach Landskron, 2024).