



Sicher Wandern 2040

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das
Wanderwegwesen - Eine Literatursynthese



Sicher Wandern 2040

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Wanderwegwesen - Eine Literatursynthese

Eine Literatursynthese zum Projekt *Sicher Wandern 2040 – Strategien für das Wanderwegwesen im Klimawandel* im Rahmen des BAFU Pilotprogramms *Anpassung an den Klimawandel*

Alexander Bast, Gregor Ortner und Michael Bründl

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

Februar 2020



In Kooperation mit



Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage, Auftrag und Zielsetzung	3
1.1	Ausgangslage	3
1.2	Auftrag und Zielsetzung	4
2	Das Wanderwegnetz der Schweiz	5
2.1	Wanderwege: Definitionen und Vorkommen.....	5
2.2	Der jüngste «Wanderboom» und Unfallstatistiken.....	9
3	Die Schweizer Klimaszenarien	10
3.1	Genereller Überblick und Grundlagen.....	10
3.2	Kernaussagen der Schweizer Klimaszenarien CH2018	11
3.3	Kernaussagen der Schweizer Klimaszenarien CH2011 und Vergleich zwischen CH2011 und CH2018.....	14
4	Auswirkungen der Klimaveränderung auf das Wandern.....	16
5	Relevante Naturgefahren und mögliche Veränderung durch die Klimaveränderung	18
5.1	Genereller Überblick.....	18
5.2	Steinschlag, Blockschlag, Felssturz und Bergsturz.....	21
5.3	Murgänge in Gräben und Wildbächen	24
5.4	Hangmuren und Rutschungen	25
5.5	Frühlings- und Sommerlawinen	27
6.	Auswirkung der Klimaveränderung auf die Kryosphäre und Prozesskaskaden	29
6.1	Genereller Überblick.....	29
6.2	Gletscher	30
6.3	Permafrost	32
6.4	Verkettung von Naturgefahren: Prozesskaskaden	35
7	Auswirkung der Klimaveränderung auf den Wald	37
8	Synthese mit Ausblick	39
9	Literaturverzeichnis.....	42
	Anhang A	49

1 Ausgangslage, Auftrag und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Wandern ist eine der beliebtesten Freizeitaktivitäten in der Schweiz (Lamprecht et al., 2014). Gemäss Fuss- und Wanderweggesetz (FWG, 1996, Art. 4 und 6) muss das verantwortliche Wanderwegwesen dafür sorgen, dass die Wanderwege frei und möglichst gefahrlos begangen werden können. Zudem sorgen die Verantwortlichen für die Planung, Anlage, den Unterhalt und die Kennzeichnung der Wege. Im Leitfaden «Gefahrenprävention und Verantwortlichkeiten auf Wanderwegen» (Bundesamt für Strassen ASTRA & Schweizer Wanderwege, 2017) sind die Prinzipien in Bezug auf Naturgefahren beschrieben.

Im Rahmen des BAFU-Pilotprogramms «Anpassung an den Klimawandel» beabsichtigt die Trägerschaft Schweizer Wanderwege (SWW) und Verein Schwyzer Wanderwege (SW), Grundlagen zur Abschätzung der Auswirkungen sich verändernder Naturgefahrenprozesse auf das Wanderwegwesen im Voralpen- und Alpenraum zu erarbeiten. Anhand von drei Pilotregionen in den Kantonen Schwyz/Luzern (Rigi), Wallis (St. Niklaus) und Graubünden (Kantonebene) soll die Bedeutung für das Wanderwegwesen getestet werden. Die Erkenntnisse sollen anschliessend unter den relevanten Akteuren verbreitet werden.

Im November 2018 wurden die Klimaszenarien CH2018 für die erwartete Klimaveränderung in der Schweiz bis Ende des 21. Jahrhunderts veröffentlicht (CH2018, 2018). Diese machen deutlich, dass sowohl in den Alpen wie auch in den tiefergelegenen Regionen mit trockeneren Sommern, einem Anstieg der Hitzetage, heftigeren Niederschlägen sowie schneeärmeren Wintern zu rechnen ist. Entsprechend ziehen sich beispielsweise Gletscher zurück, Permafrost wird wärmer respektive taut tieferreichender auf, Böden werden gegebenenfalls stärker erodiert resp. degradiert oder Wälder sind stärker von Störungen wie Windwurf, Feuer oder Insektenbefällen betroffen. Mit dem Klimawandel und den einhergehenden Auswirkungen auf Prozess- und Ökosysteme ändern sich nicht nur die Disposition und auslösenden Faktoren von Naturgefahren wie Steinschlag, Murgänge oder Rutschungen; es könnte sich ebenso das Wanderverhalten durch eine längere Wandersaison oder durch eine «Flucht aus den Städten» in die vermeintlich kühleren Gebirgsregionen verändern.

Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, in Birmensdorf, untersucht im Rahmen des Forschungsprogramms CCAMM – «Climate Change Impacts on Alpine Mass Movements» die vielschichtigen Auswirkungen einer Klimaveränderung auf gravitative Massenbewegungen im Schweizer Alpenraum (CCAMM, 2020). Das Forschungsprogramm hat im Jahr 2018 gestartet und endet bei derzeitigem Planungsstand Ende 2024. Dass das Programm CCAMM ins Leben gerufen wurde, macht deutlich, wie brisant das Thema alpine Massenbewegungen im Kontext einer Klimaveränderung für die Schweiz und ihre Bevölkerung ist. Zum anderen wird aber auch deutlich, dass vorhandene Wissenslücken

gefüllt werden müssen, um die Veränderung der Gefahrendisposition, der Dynamik von Massenbewegungen sowie ein sich dadurch veränderndes Risiko besser zu verstehen, um Anpassungsstrategien entwickeln zu können.

1.2 Auftrag und Zielsetzung

Die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL, Birmensdorf, wurde am 17. April 2019 vom Verein Schwyzer Wanderwege, SW, vertreten durch Herrn Marcel Truttmann, Brunnen beauftragt, eine Literatursynthese für das im Rahmen des BAFU-Pilotprogramms «Anpassung an den Klimawandel» finanzierten Projektes «Sicher Wandern 2040 – Strategien für das Wanderwegwesen im Klimawandel» zu erarbeiten.

In der vorliegenden Literatursynthese werden die für das Wanderwegwesen, das heisst die Wandernden und das Wanderwegnetz betreffenden, relevanten Naturgefahren identifiziert und die möglichen Auswirkungen einer Klimaveränderung abgeschätzt. Der vorliegende Bericht soll eine Wissensgrundlage für die im oben genannten Projekt organisierten Transfer- und Adaptionworkshops (zweite Projektphase) schaffen und die wichtigsten Informationen nach dem heutigen Stand des Wissens anschaulich darstellen und zusammenfassen. Es handelt sich um keinen wissenschaftlichen Literaturreview, vielmehr haben die Autoren die für sie zum Zeitpunkt der Berichterstattung relevant erscheinende Literatur zum oben genannten Zweck zusammengetragen.

An der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, ZHAW, Zürich, wurde in einer vorbereitenden Sitzung mit dem Projektausschuss am 12. März 2019 die obengenannte Zielsetzung besprochen. Die Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, vertreten durch die Herren Gregor Ortner, Michael Bründl und Alexander Bast, hat im Rahmen eines Vortrags auf einem ersten Expertenworkshop am 17. April 2019 die oben genannten Ziele nochmals zusammengetragen sowie das Konzept der vorliegenden Literaturrecherche skizziert und zur Diskussion gestellt.

2 Das Wanderwegnetz der Schweiz

2.1 Wanderwege: Definitionen und Vorkommen

Gemäss der Schweizer Norm SN 640 829a (2006) und dem Bundesgesetz über Fuss- und Wanderwege (FWG, 1996) besteht das Wanderwegnetz aus der Gesamtheit der miteinander verknüpften Wanderwege, Bergwanderwege und Alpinwanderwege. Das Wanderwegnetz erstreckt sich in der Regel ausserhalb des Siedlungsgebiets, erschliesst insbesondere für die Erholung geeignete Gebiete, schöne Landschaften, kulturelle Sehenswürdigkeiten sowie touristische Einrichtungen und bezieht nach Möglichkeit historische Wegstrecken ein (FWG, 1996; SN 640 829a, 2006).

Das Schweizer Wanderwegnetz ist von hoher Qualität und erstreckt sich über die ganze Schweiz auf über 65'000 km (Abb. 1a) (Bundesamt für Strassen ASTRA & Schweizer Wanderwege, 2017). Innerhalb der Kantone variiert die Dichte des Wanderwegnetzes zwischen 1.2 km/km² und 3.4 km/km² (Schweizer Wanderwege, 2011). Den grössten Anteil am Wanderwegnetz haben die drei Kantone Graubünden (~10'500 km), Bern (~10'100 km) und Wallis (~8'400 km) (Schweizer Wanderwege, 2011). Gesamtschweizerisch befinden sich ~21 % zwischen 1'000 m ü. M. und 1'500 m ü. M., ~16 % zwischen 1'500 m ü. M. und 2'000 m ü. M., ~7 % zwischen 2'000 m ü. M. und 2'500 m ü. M. und ~1 % zwischen 2'500 m ü. M. und 3'000 m ü. M. (Abb. 1c). Etwa ein Viertel aller Wanderwege (~26 %) verlaufen in bewaldeten Gebieten. Die Höhenverteilung der Wege reicht von 200 m ü. M. Seehöhe bis auf 3'600 m ü. M. und erstreckt sich somit über 3'400 Höhenmeter. Die Kantone Wallis, Graubünden, Uri, Tessin und Bern haben dabei die grössten Anteile mit Wegen über 2'000 m ü. M. und gelten daher als besonders exponiert gegenüber Naturgefahren (Schweizer Wanderwege, 2011).

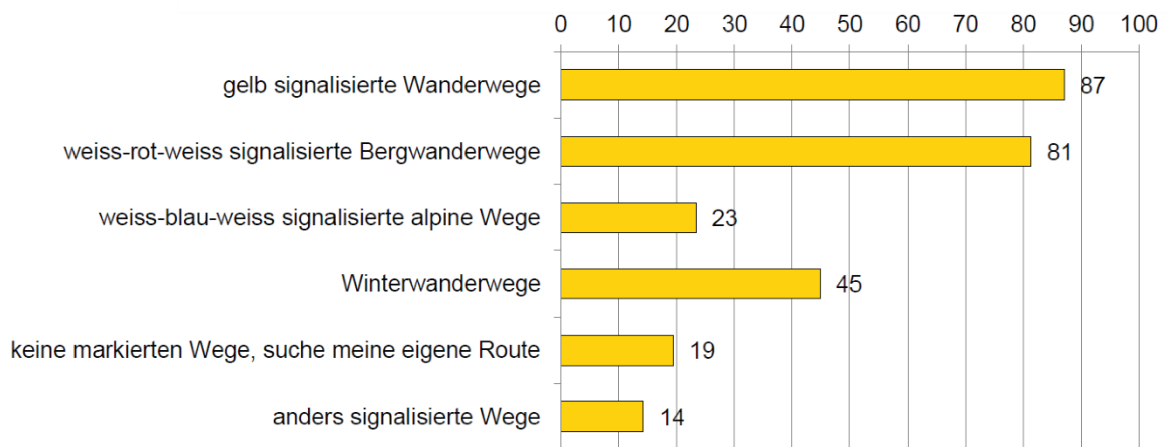
Über die gesamte Schweiz verteilt sind ~ 64 % der Wege im Wanderwegnetz Wanderwege, ~ 35 % Bergwanderwege und ~ 1 % Alpinwanderwege (Schweizer Wanderwege, 2011). Abbildung 1 zeigt das Schweizer Wanderwegnetz. Es werden die drei Wanderwegkategorien verteilt auf die Schweizer Kantone sowie auf die drei Schweizer Grossregionen Jura, Mittelland und Alpen dargestellt (Abb. 1). Deutlich zu erkennen ist, dass im Alpenraum alle drei Wanderwegkategorien vertreten sind, wobei Bergwanderwege die Mehrheit darstellen.

Die drei Wanderwegkategorien des Wanderwegnetzes lassen sich gemäss Schweizer Norm SN 640 829a (2006) wie folgt beschreiben:

- (i) Wanderwege sind allgemein zugängliche und in der Regel für zu Fuss Gehende bestimmte Wege. Sie verlaufen in der Regel abseits von motorisierten Strassen und weisen möglichst keine Asphalt- oder Betonschichten auf. Steile Passagen werden mit Stufen überwunden, Absturzstellen werden mit Geländern gesichert und Fliessgewässer können problemlos über Stege oder Brücken passiert werden. An die Benutzer stellen die in Gelb signalisierten Wanderwege keine besonderen Anforderungen.
- (ii) Bergwanderwege sind Wanderwege, welche teilweise unwegsames Gelände erschliessen. Sie sind überwiegend steil und schmal angelegt. Bergwanderwege sind stellenweise exponiert; besonders schwierige Passagen sind mit Seilen oder Ketten gesichert. Bäche sind unter Umständen über Furten zu passieren. Die Wegweiser von Bergwanderwegen sind gelb mit weiss-rot-weisser Spitze, Bestätigungen und Markierungen sind weiss-rot-weiss. Benutzer von Bergwanderwegen müssen trittsicher, schwindelfrei und in guter körperlicher Verfassung sein und die Gefahren, wie Steinschlag, Rutsch- und Absturzgefahr oder Wetterumsturz im Gebirge, kennen. Vorausgesetzt wird festes Schuhwerk mit griffiger Sohle, der Witterung entsprechende Ausrüstung und das Mitführen von Karten.
- (iii) Alpinwanderwege sind anspruchsvolle Bergwanderwege, welche teilweise durch wegloses Gelände, über Schneefelder, Gletscher, Geröllhalden, durch Steinschlag betroffene Runsen oder Fels mit kurzen Kletterstellen verlaufen. Bauliche Vorkehrungen können nicht vorausgesetzt werden und beschränken sich allenfalls auf Sicherungen von besonders exponierten Stellen mit Absturzgefahr. Die Wegweiser sind blau mit weiss-blau-weisser Spitze, Bestätigungen und Markierungen sind weiss-blau-weiss. Benützer von Alpinwanderwegen müssen trittsicher, schwindelfrei und in sehr guter körperlicher Verfassung sein und den Umgang mit Seil und Pickel sowie das Überwinden von Kletterstellen unter zu Hilfenahme der Hände beherrschen. Sie müssen die Gefahren im Gebirge kennen. Zusätzlich zur Ausrüstung für Bergwanderwege werden Höhenmesser und Kompass, für Gletscherüberquerungen Seil und Pickel vorausgesetzt.

Aus einer Befragung des Bundesamtes für Strassen ASTRA geht hervor, dass alle drei Wanderwegkategorien häufig genutzt werden. So nutzen 90 % der Wandernden gelb signalisierte Wanderwege, etwa vier Fünftel der Teilnehmenden nutzen Bergwanderwege und rund ein Viertel sind auf Alpinwanderwegen unterwegs (Abb. 2a). Ein Fünftel aller Wandernden nutzen alle der oben definierten drei Wanderwegkategorien, lediglich 15 % begehen nur gelb signalisierte Wanderwege (Abb. 2b) (Fischer et al., 2015).

a) Anteil von Wandernden auf unterschiedlichen Wanderwegen [%] (insgesamt 2'084 Befragte)



b) Nutzung der drei Wanderwegkategorien Wanderwege, Bergwanderwege und Alpinwanderwege (insgesamt 2'084 Befragte)

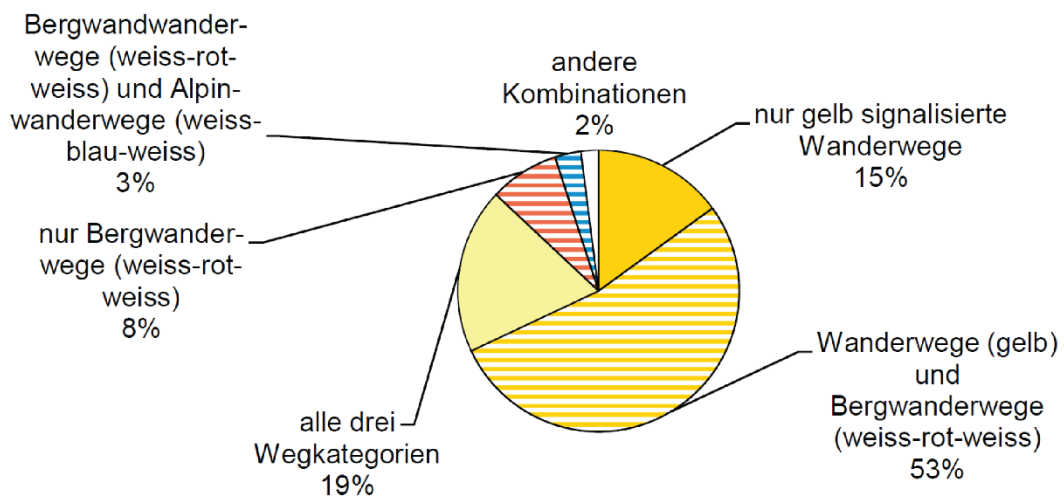


Abb. 2: Ergebnisse einer Befragung des Bundesamtes für Strassen ASTRA aus dem Jahr 2014 zur Nutzung der Wanderwege in der Schweiz (verändert nach: Fischer et al., 2015).

2.2 Der jüngste «Wanderboom» und Unfallstatistiken

Wandern ist in der Schweiz eine der populärsten Freizeitaktivitäten und gewann in den letzten Jahren vermehrt an Zuspruch. Im Jahr 2016 schreibt Adrian Gottwald in der Neuen Zürcher Zeitung NZZ, dass soziale Netzwerke ungewohnt «viele Bilder von Berglandschaften und in der Sonne flimmernden Alpseen» zeigten: Die Schweiz wird zu Fuss erkundet; «aus wandern wurde *Hiking* - trendig, dynamisch und naturverbunden». Nicht zuletzt sprechen auch Alpenvereine von einem «Wanderboom». Rund 44 % der Schweizer Wohnbevölkerung zwischen 15 und 74 Jahren bezeichnet Wandern als eine von ihnen ausgeübte Sportart. Hochgerechnet sind das etwa 2.7 Millionen Schweizer Wandernde. Der Zuwachs von 2008 bis 2014 beläuft sich auf ~ 7 % (Lamprecht et al., 2014). Das Durchschnittsalter der Wandernden liegt bei 49 Jahren. Zu den 2.7 Millionen Schweizer kommen jährlich noch ca. 300'000 Touristen aus dem Ausland hinzu. Die Schweizer Wohnbevölkerung verzeichnet pro Jahr ca. 54 Millionen Wandertage, wobei ein Wandertag durchschnittlich mit drei Wanderstunden pro Tag definiert ist. Dies entspricht ca. 162 Millionen Wanderstunden. Die meisten Wanderungen finden von Frühling bis Herbst statt (Fischer et al., 2015).

Gemäss dem Bundesgesetz über Fuss- und Wanderwege (FWG, 1996) sollen Wanderwege «möglichst gefahrlos» begangen werden können (Art. 6, Abs. 1, Bst. b, FWG, 1996). Unfälle müssen dadurch nicht vollständig vermieden werden. Gemessen an der Länge des Wanderwegnetzes und der Aufenthaltszeit von Wandernden in etwaigen Gefahrenbereichen kommt es aber selten zu schweren Verletzungen oder tödlichen Unfällen (Bundesamt für Strassen ASTRA & Schweizer Wanderwege, 2017). Die hohen Standards bei der Planung, beim Unterhalt und der Signalisation der Wanderwege treten hier positiv in Erscheinung. Die Zahlen der *Alpinen Rettung Schweiz* und des *Schweizerischen Alpen Clubs* (SAC) zeigen die Relevanz von sicherheitstechnischen Massnahmen beim Wandern. Gemäss den Statistiken geschehen beim Bergwandern mit Abstand die meisten Unfälle pro Jahr. Zum Vorschein treten in der Statistik neben Unfällen durch Sturz (am häufigsten im Fünfjahresdurchschnitt 2014 bis 2018), Erkrankung, Blockierung, Verirrung, Tiereinwirkung und Erdrücken bzw. Einklemmen auch Unfälle durch Steinschlag (fünfhäufigste Ursache im Fünfjahresdurchschnitt 2014 bis 2018). Dies ist auch bei der langjährigen Zeitreihe von tödlichen Unfällen erkennbar. Die meisten Unfälle ereignen sich in den beiden Sommermonaten Juli und August. Im Jahr 2018 wurden 57 Todesfälle registriert, davon waren 52 auf Absturz zurückzuführen. Zwischen den Jahren 2014 und 2018 starben, über alle Sportarten hinweg, 586 Personen in den Bergen. Knapp die Hälfte der Verunfallten waren älter als 50 Jahre (Bundesamt für Strassen ASTRA & Schweizer Wanderwege, 2017; SAC Schweizer Alpen Club, 2019).

3 Die Schweizer Klimaszenarien

3.1 Genereller Überblick und Grundlagen

Die neuen Schweizer Klimaszenarien «CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz» (NCCS2018, 2018; CH2018, 2018) wurden im November 2018 vorgestellt und basieren, wie die beiden vorhergehenden Szenarien «Klimaänderungen und die Schweiz 2050» (OcCC, 2007) und «Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz CH2011» (CH2011, 2011), auf Klimamodellen respektive Klimasimulationen und Annahmen zu zukünftigen Emissionsszenarien. Der Mehrwert der neuen Szenarien CH2018 liegt in der erweiterten Wissensgrundlage wie beispielsweise durch längere Beobachtungsreihen oder neueste Erkenntnisse aus der Wissenschaft sowie besseren, höher aufgelösten und neuen globalen sowie regionalen Klimasimulationen (CH2018, 2018). Bisherige Studien zu Klimawandelauswirkungen für die Schweiz, wie beispielsweise CH2014-Impacts (2014), beruhen auf den Klimaszenarien CH2011 oder CH2007. Dies gilt es im vorliegenden Bericht zu berücksichtigen; folgend wird daher neben dem Fokus auf die neuen Szenarien CH2018 ein kurzer Vergleich zwischen CH2018 und CH2011 gezogen.

Die Klimaszenarien CH2018 wurden auf dem regionalen Klimamodelensemble EURO-CORDEX erstellt, was die Einteilung in drei Emissionsszenarien ermöglicht (Giorgi et al., 2009; CH2018, 2018; CORDEX, 2019). Im Szenario RCP8.5 («kein Klimaschutz») nehmen die Emissionen stetig zu, da keine Klimaschutzmassnahmen getroffen werden. Im Szenario RCP2.6 («konsequenter Klimaschutz») kann die globale Erwärmung auf 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Zustand durch umgehend eingeleitete Klimaschutzmassnahmen begrenzt werden (CH2018, 2018; NCCS2018, 2018). Die Klimaszenarien CH2018 beschreiben den Mittelwert der Klimaverhältnisse über drei Referenzzeiträumen von je 30 Jahren, welche sich um die Jahre 2035 (2020 bis 2045; «nahe Zukunft»), 2060 (2045 bis 2074; «Mitte des Jahrhunderts») und 2085 (2070 bis 2099; «Ende des Jahrhunderts») gruppieren. Mittlere, saisonale Veränderungen bzgl. Temperatur, Niederschlag und Stressindikatoren wurden für die fünf Modellregionen Nordostschweiz (CHNE), Westschweiz (CHW), Südschweiz (CHS), westliche Schweizer Alpen (CHAW) und östliche Schweizer Alpen (CHAE) simuliert. Generell ist zu beachten, dass Klimaschwankungen die unten beschriebenen Trends verschleiern können. Die Modellierungen für Temperaturen sind «verlässlicher», als die für Niederschläge. Das heisst, die Streuungen respektive die Ensemblebandweiten (Bandweite mehrerer Klimamodelle) sind in der Regel grösser für die Niederschlagsprognosen. Dies liegt unter anderem daran, dass die Schweiz bzw. der Alpenraum den Übergang zwischen Mittel- bzw. Nordeuropa

und Südeuropa bilden. Ungenauigkeiten ergeben sich auch durch die enorme Reliefenergie der Alpen, was insbesondere im sogenannten «downscaling», dem «herunterrechnen» von grob aufgelösten (globalen) Klimamodellen auf feiner bzw. höher aufgelöste lokale Klimamodelle, zum Vorschein kommt.

Im Hinblick auf das vorliegende Projekt «Sicher Wandern 2040» werden folgend die wichtigsten, mittleren Veränderungen für die gesamte Schweiz um das Jahr 2060 (2045 – 2074, «Mitte des Jahrhunderts») zum gegenwärtigen Bezugszeitraum 1981 bis 2010 mit und ohne einschneidende klimapolitische Massnahmen (RCP2.6 bzw. RCP8.5) zusammengefasst. Das Szenario «Mitte des Jahrhunderts» wurde gewählt, da (i) nur geringe Veränderungen im Szenario «nahe Zukunft» erwartet werden, (ii) den Verantwortlichen dadurch eine frühzeitige Integration resp. Planung im Hinblick auf die Strategien des Wanderwegwesen ermöglicht wird (gemäss FWG, 1996, erfolgt die periodische Überprüfung der Wanderwegnetzpläne in der Regel lediglich alle 10 Jahre). Detaillierte Informationen zu den einzelnen Modellregionen, Skalen und weiteren Emissionsszenarien sind den beiden Berichten «CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland. Technical Report.» (NCCS2018, 2018) und «CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz» (CH2018, 2018) zu entnehmen.

3.2 Kernaussagen der Schweizer Klimaszenarien CH2018

Gemäss den neuesten Schweizer Klimaszenarien steigt die Jahresmitteltemperatur der Schweiz gegenüber dem Bezugszeitraum weiter an. Ohne Klimaschutz (RCP8.5) ist von einer Erwärmung der bodennahen Lufttemperatur bis zur Mitte des Jahrhunderts («2060») zwischen 2.0 °C und 3.3 °C auszugehen, mit konsequentem Klimaschutz (RCP 2.6) liegt die erwartete Erwärmung mit Werten zwischen 0.7 °C und 1.9 °C deutlich geringer (Tab. 1, Abb. 3). Der prognostizierte Temperaturanstieg variiert regional sowie saisonal und bedingt eine Veränderung weiterer Klimaindikatoren, nicht zuletzt da wärmere Luft deutlich mehr Wasser aufnehmen kann.

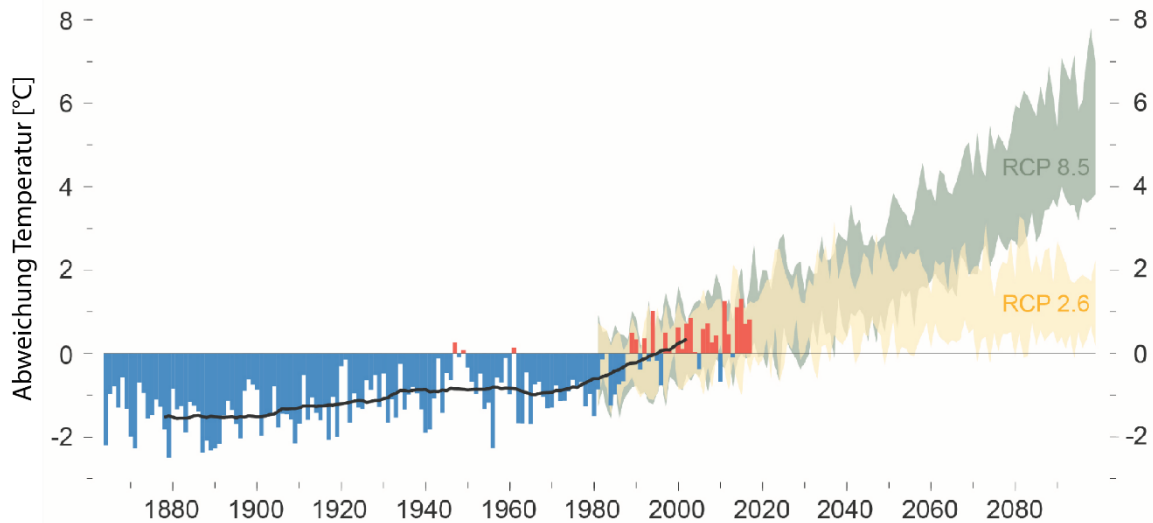


Abb. 3: Entwicklung der Schweizer Jahresmitteltemperatur von 1864 bis 2099. Negative Abweichungen zum Referenzzeitraum 1981 bis 2010 in blauer, positive in roter Farbe. Grün und orangefarbene Schattierungen zeigen die Simulationsbandweiten der beiden Emissionsszenarien RCP 2.6 (konsequenter Klimaschutz) und RCP8.5 (kein Klimaschutz) (verändert nach: CH2018, 2018, Fig. 11.1).

Für die Schweiz lassen sich bis Mitte des Jahrhunderts («2060») folgende Kernaussagen treffen:

- (i) Die Sommer werden trockener, da die Sommerniederschläge abnehmen werden und durch die höheren Temperaturen die Verdunstung zunimmt. Es gibt weniger Regentage und Trockenperioden halten länger an (Tab. 1). Gebiete im Westen und Süden sind stärker betroffen als Gebiete im Osten.
- (ii) Die Frequenz und Magnitude von Starkniederschlägen (stärkster jährlicher Eintagesniederschlag) nehmen über alle Jahreszeiten zu, wobei das Signal in den Wintermonaten am deutlichsten ist (Tab. 1). Ebenso verstärken sich seltene Extremereignisse (100-jährliches Eintagesniederschlagsereignis) in allen Jahreszeiten. Im Sommer nimmt die Niederschlagssumme zwar voraussichtlich ab, Einzelereignisse verstärken sich jedoch.
- (iii) Neben den höheren Durchschnittstemperaturen steigen auch die Höchsttemperaturen deutlich an. Heisse Nächte und Tage werden extremer und häufiger, insbesondere in den tiefergelegenen Gebieten und urbanen Gebieten (Tab. 1).
- (iv) Die tiefergelegenen Regionen der Schweiz müssen mit weniger und selteneren Schneefällen rechnen. Gemäss Simulationen fällt zwar im Winter mehr Niederschlag, welcher jedoch durch die höheren Lufttemperaturen als Regen zu Boden fällt (Tab. 1). Die Nullgradgrenze steigt in ihrer Höhenlage im Vergleich zum Referenzzeitraum zwischen 400 m und 650 m an (Abb. 4).

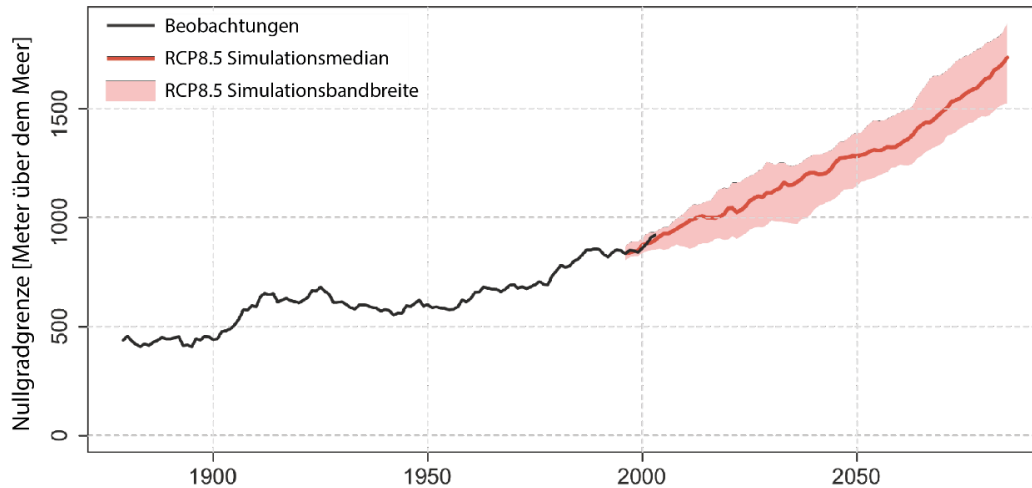


Abb. 4: Entwicklung der Nullgradgrenze im Winter (Schweizer Mittel) (verändert nach: CH2018, 2018, Fig. 5.19).

Tab. 1: Klimatische Schlüsselindikatoren für die beiden Emissionsszenarien RCP8.5 (kein Klimaschutz) und RCP2.6 (konsequenter Klimaschutz). Dargestellt sind die Veränderungen (Median und Schwankungsbereich) bis Mitte des Jahrhunderts (2045 bis 2074) zum gegenwärtigen Bezugsraum für die ganze Schweiz (verändert nach: CH2018, 2018).

Klimaindikator	RCP8.5	RCP2.6
Temperatur		
Jahresmitteltemperatur [°C]	+2.6 (+2.0 +3.3)	+1.2 (+0.7 +1.9)
Sommertemperatur [°C]	+2.9 (+2.3 +4.4)	+1.6 (+0.9 +2.5)
Wintertemperatur [°C]	+2.4 (+1.8 +3.3)	+1.3 (+0.6 +1.9)
Niederschläge im Sommer		
Sommerniederschlag [%]	-11 (-25 +9)	-3 (-16 +7)
stärkster jährlicher Eintagesniederschlag, Sommer [%]	+6 (-9 +16)	+2 (-9 +10)
100-jährliches Eintagesniederschlagsereignis, Sommer [%]	+12 (-9 +29)	+5 (-6 +17)
Niederschläge im Winter		
Winterniederschlag [%]	+8 (-3 +21)	+7 (-1 +16)
stärkster jährlicher Eintagesniederschlag, Winter [%]	+9 (-1 +20)	+7 (-6 +21)
100-jährliches Eintagesniederschlagsereignis, Winter [%]	+8 (-5 +28)	+7 (-9 +28)
(Hitze)Stress		
wärmster Tag im Jahr [°C]	+3.5 (+2.0 +5.7)	+1.6 (+1.0 +3.2)
Hitzetage ¹⁾ [Tage]	+7 (+3 +17)	+2 (0 +8)
Längste Sommertrockenperiode ²⁾ [Tage]	+1 (0 +9)	+1 (-1 +3)

¹⁾ TX99P / very hot days (TX99P) / 1% heisseste Tage aller Sommer des Referenzzeitraums; ²⁾ CDD: Consecutive Dry Days;

3.3 Kernaussagen der Schweizer Klimaszenarien CH2011 und Vergleich zwischen CH2011 und CH2018

Die Klimaszenarien CH2011 zeigten ohne Klimaschutz (A2 Szenario) eine Zunahme der Lufttemperatur zwischen 3.2 °C und 4.8 °C bis zum Ende des Jahrhunderts gegenüber dem Bezugsraum 1980 – 2009. Eine Erwärmung ist in allen Regionen und Jahreszeiten zu erwarten (Abb. 5), wobei die Temperaturzunahme südlich der Alpen im Sommer am deutlichsten ist. Extreme Hitzewellen werden häufiger und intensiver, extreme Kälteeinbrüche werden weniger und warme Perioden im Winter nehmen zu (CH2011, 2011; Henne et al. 2018). Südlich der Alpen wird eine Zunahme der Winterniederschläge erwartet. Sommerniederschläge nehmen schweizweit ab (Abb. 5).

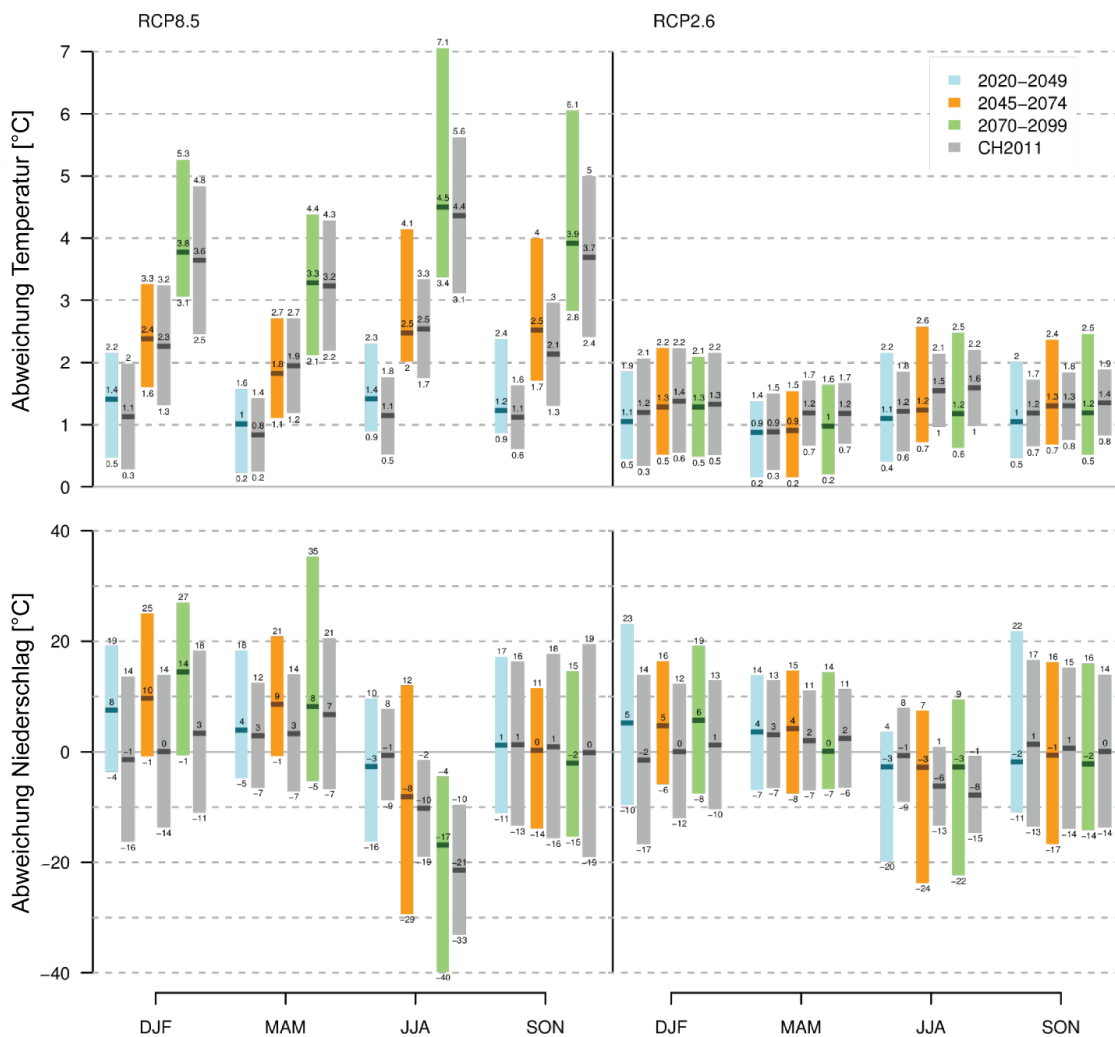


Abb. 5: Durchschnittliche, saisonale Abweichung der Temperatur und Niederschlag im Vergleich zwischen den Schweizer Klimaszenarien CH2018 und CH2011 für die beiden Emissionsszenarien RCP2.6 (konsequenter Klimaschutz) und RCP8.5 (kein Klimaschutz). Gezeigt werden die Veränderungen für die Nordostschweiz und den drei modellierten Referenzzeiträumen «2035», «2060» und «2085» (verändert nach: CH2018, 2018, Fig. 8.1).

Aus wissenschaftlicher Perspektive ist ein Vergleich zwischen den beiden Szenarien CH2011 und CH2018 schwierig. Dies bedingt sich unter anderem durch unterschiedliche Auflösungen, Emissionsszenarien oder die Bestimmung der Unsicherheiten. Um eine rasche Abschätzung der Unterschiede zwischen den beiden Szenarien zu erhalten, kann für praktische Anwendungen durchaus ein Vergleich gezogen werden.

Generell zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den beiden Klimaszenarien, welche mit Blick auf die Temperaturveränderung deutlich wird (Abb. 5). Die CH2018 Szenarien prognostizieren einen signifikanten Temperaturanstieg über alle Jahreszeiten hinweg, mit der grössten Ausprägung in den Sommermonaten. Vergleicht man lediglich die robusten Mittelwerte, ist die Aussage im Einklang mit CH2011; markant auffallend sind dagegen die deutlich höheren Streuungen der CH2018 Simulationen.

Betrachtet man die Mediane und Streuung der prognostizierten Niederschlagsveränderungen werden die Unstimmigkeiten zwischen CH2018 und CH2011 deutlicher (Abb. 5). CH2018 prognostiziert einen Anstieg der Winter- und Frühjahrsniederschläge, unveränderte Herbstniederschläge und in der Tendenz eine Abnahme der Sommerniederschläge. Trockenere Sommer wurden bereits in CH2007 und CH2011 simuliert; die Streuung in CH2018 ist am grössten. CH2018 zeigt schweizweit einen beachtlichen Anstieg der Winterniederschläge. In CH2011 war dieser Anstieg lediglich in der Südschweiz zu verzeichnen.

4 Auswirkungen der Klimaveränderung auf das Wandern

Im Jahr 2017 wanderten ~ 7 % mehr als noch neun Jahre zuvor (Schweizer Tourismus Verband, 2018). Die Konjunkturforschungsstelle der Eidgenössisch Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) geht von einem aufwärtsgerichteten Trend bei den Logiernächten in Feriengebieten im Sommer für die kommenden Jahre aus (Abrahamsen et al., 2019). Es wird erwartet, dass im Sommertourismus die wirtschaftlichen Erträge durch den Klimawandel steigen (Abegg et al., 2013; Köllner et. al., 2017). Die zukünftige Entwicklung des Wanderwesens wird als optimistisch angesehen. Bis 2040 wird von einem Marktwachstum ausgegangen. Die Ursachen hierfür sind vielfältig. Zum einen gibt es für das Wandern beinahe keine technischen und körperlichen Einstiegsbarrieren und es muss keine neue Bewegungsform erlernt werden. Die naturnahe, sportliche Betätigung wirkt sich positiv auf Gesundheit und das Wohlbefinden aus und erfreut sich daher zunehmender Beliebtheit. Auf die gesundheitlich-positiven Aspekte des Wanderns wird auch in Zukunft gesetzt. Zum anderen wird zunehmend auf das Internet bzw. auf mobile Applikationen (Apps) als Informationsplattform für die Wandernden gesetzt. Die Tourenplanung wird noch einfacher und Wandern wird dadurch verstärkt zum Breitensport. Diese Faktoren könnten zu mehr (auch unerfahrenen) Personen auf Wanderwegen führen (Dicks & Neumeyer, 2010). Eine direkte Auswirkung auf die Unfallstatistiken ist daher denkbar.

Hinzu kommen Veränderungen in den Umweltbedingungen, welche die Wandertätigkeit in Zukunft beeinflussen können. Laut Serquet & Rebetez (2011) besteht eine Korrelation zwischen den Sommertemperaturen und dem Tourismus im europäischen Alpenraum. Höhere Temperaturen in grösseren Agglomerationen führen zu einer Zunahme der Logiernächte in Berggebieten durch die in den tieferen Lagen wohnhaften Touristen. Ein Anstieg der Übernachtungszahlen ist vor allem in stadtnahen Berggebieten zu erwarten. Durch die Zunahme von Hitzewellen wird erwartet, dass Touristen häufiger und über eine längere Aufenthaltsdauer in die Bergregionen kommen, was sich zusätzlich in den erwarteten Übernachtungszahlen niederschlagen dürfte (Serquet and Rebetez 2011). Durch den Klimawandel und die erhöhte Lufttemperatur sowie die veränderten Niederschlagsregime wird die Schneebedeckung der Alpen im Winter kürzer. Im Vergleich zum Jahr 1970 bildet sich «heute» die Schneedecke durchschnittlich zwölf Tage später aus und apert 26 Tage früher aus (Klein et al., 2016). Dies führt zu einer Verlängerung der

Wandersaison. Im Herbst ist im Alpenraum eine Temperaturzunahme zu beobachten. Folgend kann an mehr Tagen pro Jahr gewandert werden.

Eine Verlängerung der Wandersaison erhöht möglicherweise die Exposition gegenüber Naturgefahren. An Gletschern respektive im hochalpinen Gebieten wo Eis, Firn und Schnee schmelzen, kann zukünftig das Wanderwegnetz erweitert werden (Begert et al., 2005).

Für die Entwicklung des Wandertourismus im Zuge des Klimawandels spielen unterschiedliche Faktoren und Akteure eine wesentliche Rolle. Das Wirkungsgefüge der verschiedenen Faktoren, Akteuren und Interessensgruppen wird in Abbildung 6 dargestellt. Die Abbildung macht deutlich, dass der Klimawandel, die gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung sowie die Politik und der Tourismus in direktem Zusammenhang stehen. Zukünftig wird das Zusammenspiel aus Infrastrukturbetreibern sowie Politik und Tourismus nicht zuletzt durch den Klimawandel und einen vermutlich anhaltenden Wanderboom immer wichtiger (Braun, 2009).

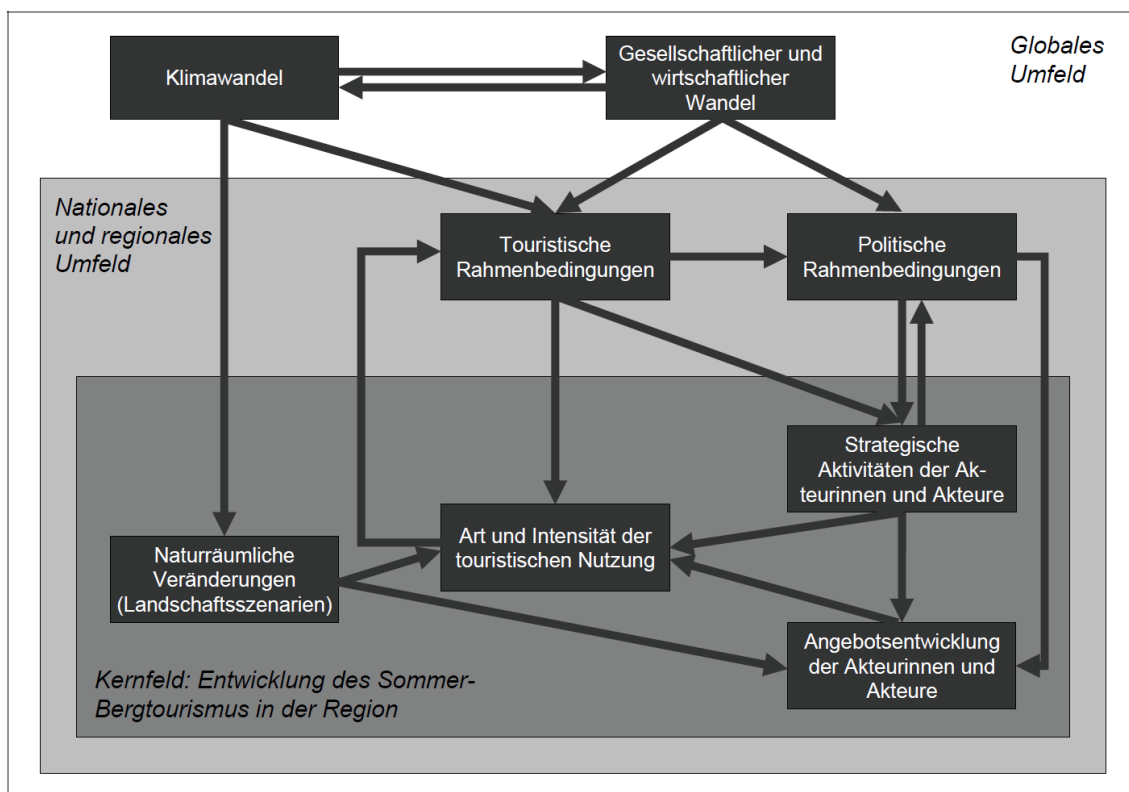


Abb. 6: Wirkungsgefüge zur zukünftigen Entwicklung des Sommer-Bergtourismus in hochalpinen Gebieten Österreichs (aus: Braun, 2009).

5 Relevante Naturgefahren und mögliche Veränderung durch die Klimaveränderung

5.1 Genereller Überblick

5.1.1 Für die Gefahrenprävention relevante Naturgefahren

Wandernde setzen sich insbesondere im alpinen Gelände einer Vielzahl von Naturgefahren aus. Auf Wanderwegen ist die Naturgefahrenprävention auf spontan auftretende Gefahren beschränkt. Die Wandernden können sich aufgrund der Intensität der Ereignisse nicht wirksam schützen (Bundesamt für Strassen ASTRA & Schweizer Wanderwege, 2017). Dies ist primär dadurch zu begründen, dass insbesondere das Auftreten gravitativer Naturgefahren derzeit nicht oder nur sehr schwierig vorhersehbar ist. Die Entwicklung von Frühwarnsystemen kann hier zumindest die Gefahr für die Wandernden reduzieren; die Wanderweginfrastruktur bleibt dennoch gefährdet.

Aufgrund der Spontanität und der Intensität des Prozesses werden sogenannte gravitative Naturgefahren für die Gefahrenprävention als auch für die Wegerhaltung (Wanderweginfrastruktur) als relevant eingestuft. Beim ersten Expertenworkshop des vorliegenden Projekts «Sicher Wandern 2040» am 17. April 2019 an der Zürcher Fachhochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) in Zürich, wurden folgende Gefahren beziehungsweise Prozesse als relevant klassifiziert (vgl. Abb. 7):

- (i) Sturzprozesse: Steinschlag / Steinhagel, Blockschlag, Felssturz, Bergsturz (Abb. 7a/b)
- (ii) Murgänge in Gräben und Wildbachprozesse (Abb. 7c)
- (iii) Hangmuren und Rutschungen (Abb. 7d/e/f)
- (iv) Frühlings- und Sommerlawinen

Gravitative Massenbewegungen stehen in der Regel im Zusammenhang mit einer «ungünstigen» geologischen und / oder geomorphologischen Disposition sowie einem auslösenden Ereignis. Eine Veränderung der Disposition gravitativer Naturgefahren durch den Klimawandel sowie vermehrte extreme Ereignisse sind die wahrscheinlichsten Ursachen für eine allgemeine Zunahme der alpinen Naturgefahren.

Generell wird bei alpinen Naturgefahren nach der Prozessart und dem Prozessablauf in Sturzprozesse, Rutschungen und Flüssen unterschieden (Prinz & Strauss, 2012). Naturgemäss können ebenso

Mischformen der Prozesse auftreten. Gemein haben alle gravitativen Gefahren, dass der Prozess räumlich durch die Topographie von der Gefahrenquelle bis zum Ablagerungsgebiet begrenzt wird. Eine allgemein wichtige Rolle in der Gefahrenbeurteilung spielen der Prozessraum der Gefahren, sowie die Intensität, das heisst die beim Prozessablauf entstehenden Kräfte oder Energien, anhand derer die Zerstörungskraft angegeben wird. Ebenso ist die Wiederkehrperiode eines Gefahrenprozesses wesentlich für die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit.

5.1.2 Naturgefahren welche der Eigenverantwortung unterliegen

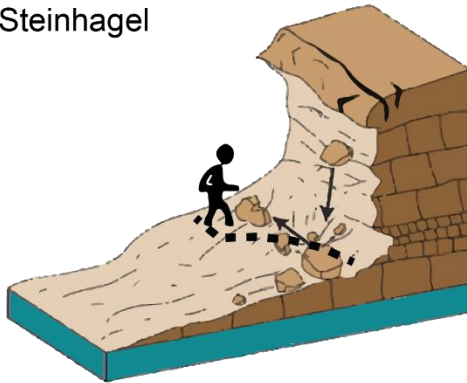
Gefahren, die von Wandernden durch vorausschauende Planung vermieden werden können und daher zu einem grossen Teil der Eigenverantwortung unterliegen, werden bei der Naturgefahrenprävention basierend auf dem Fuss- und Wanderweggesetz (FWG, 1996, Artikel 6) in der Regel nicht berücksichtigt (Bundesamt für Strassen ASTRA & Schweizer Wanderwege, 2017).

Zu diesen Gefahren zählen:

- (i) Meteorologische Gefahren: Sturm, Hagel, Starkniederschläge, Gewitter, Nebel und Schneefall im Sommer
- (ii) Hochwasser und Überschwemmung
- (iii) Schneefelder
- (iv) Eisbildung am Weg
- (v) Gletscherspalten
- (vi) Windwurf und Fallholz

Bei diesen Gefahren kann davon ausgegangen werden, dass eine nicht quantifizierbare Veränderung durch den Klimawandel möglich ist. Entsprechend können erhebliche Schäden am Wanderwegnetz (Wanderweginfrastruktur) entstehen.

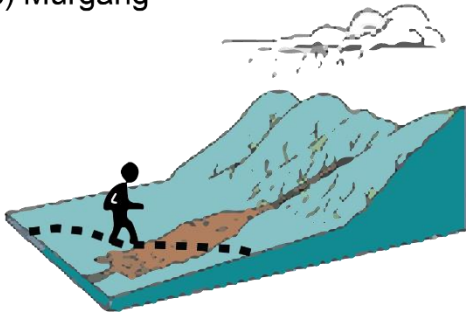
a) Steinschlag & Steinhagel



b) Felssturz



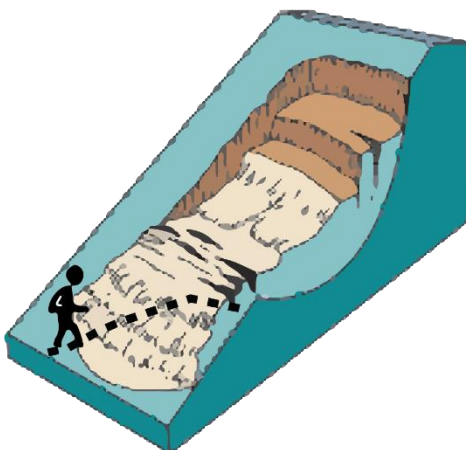
c) Murgang



d) flachgründige Rutschungen & Hangmuren



e) Rotationsrutschung



f) Translationsrutschung

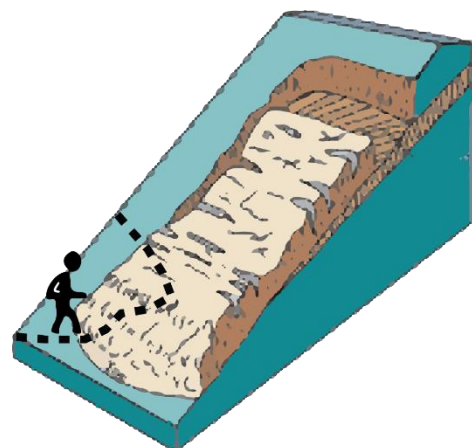


Abb. 7: Blockbilder zu schematischen Prozessabläufen und Prozessklassifikationen nach Varnes 1978 (verändert nach: Highland & Bobrowsky, 2008)

5.2 Steinschlag, Blockschlag, Felssturz und Bergsturz

5.2.1 Prozesse

Steinschlag, Blockschlag, Felssturz und Bergsturz sind Sturzprozesse und werden als schnelle Massenbewegungen verstanden, bei denen sich das aus dem Gesteinsverband losgelöste Material fallend, rollend oder springend talwärts bewegt. Den größten Teil der Strecke legt es dabei in der Luft zurück, wodurch die Gesteinsmasse hohe Geschwindigkeiten erreichen kann (Abb. 7a & b). Blockschlag, Felssturz und Bergsturz werden gemäss dem stürzenden Volumen klassifiziert (Tab. 2) (BAFU, 2016a; BAFU, 2016b). Stein- und Blockschlag wirken grundsätzlich in Linienform (Abb. 8a). Das Einzelereignis hat daher eine niedrige räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit. Im Falle von Steinhagel oder bei Fels- und Bergstürzen tritt der Prozess mit flächenhafter Wirkung und einer damit verbundenen höheren räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit auf (Abb. 8c) (Bründl, 2009; EconoMe Consortium, 2019).

Tab. 2: Klassifikation der Sturzprozesse nach Durchmesser und Volumen, Schutz vor Massenbewegungen (verändert nach: BAFU, 2016a)

Prozess	Komponenten- durchmesser [cm]	Volumen [m ³]	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.

5.2.2 Erwartete Veränderungen

In Zukunft ist insbesondere im alpinen und hochalpinen Gelände mit einer Zunahme der Klimasensitivität von Frequenz und Magnitude der Sturzprozesse zu rechnen (Abb. 9a/b) (Mani & Caduff, 2012). In den

nicht alpinen Gebieten bleibt die Klimasensitivität der Sturzprozesse gleich oder nimmt sogar ab. Die Zunahme der Sturzprozesse betrifft vor allem Gletscherrückzugsgebiete sowie Gebiete mit Permafrost (vgl. Kapitel 6) (Fehlmann, 2016). Auslöser sind die Destabilisierung der ehemals vergletscherten Hänge sowie der zunehmende Temperaturanstieg und die damit einhergehende Permafrostdegradation (Kapitel 6) (Krautblatter et al., 2013). Ebenso können zunehmende Starkniederschläge die Aktivität in den bereits bestehenden Gebieten erhöhen. Es ist weniger davon auszugehen, dass durch den Klimawandel neue Gefahrenquellen entstehen. Eine Zunahme von Frequenz und Magnitude im alpinen Raum in bereits bestehenden «Problemgebieten» ist aber zu erwarten.

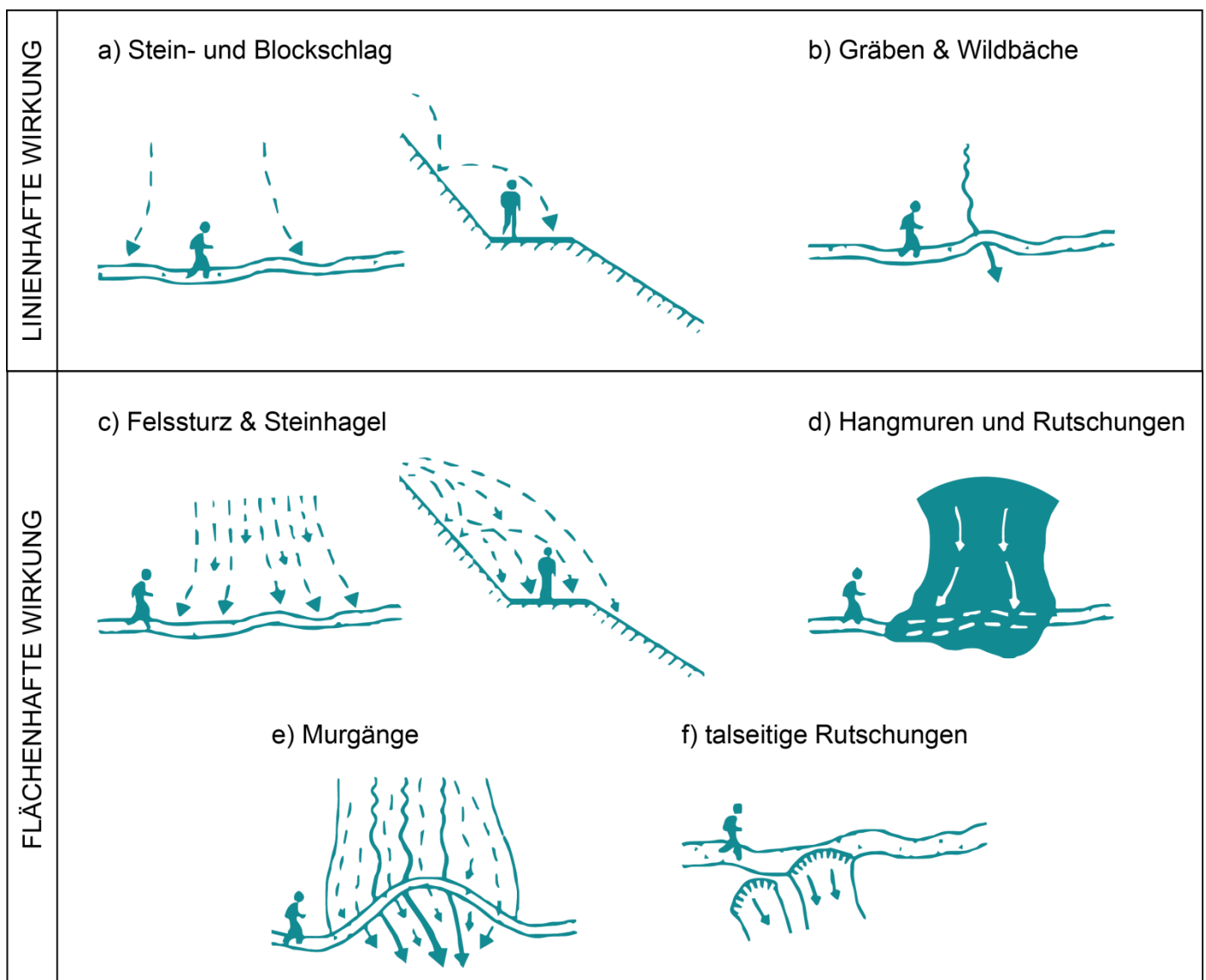


Abb. 8: Linienförmige und flächenhafte Wirkung der Gefahrenprozesse (verändert nach: Bundesamt für Strassen ASTRA & Schweizer Wanderwege, 2017).

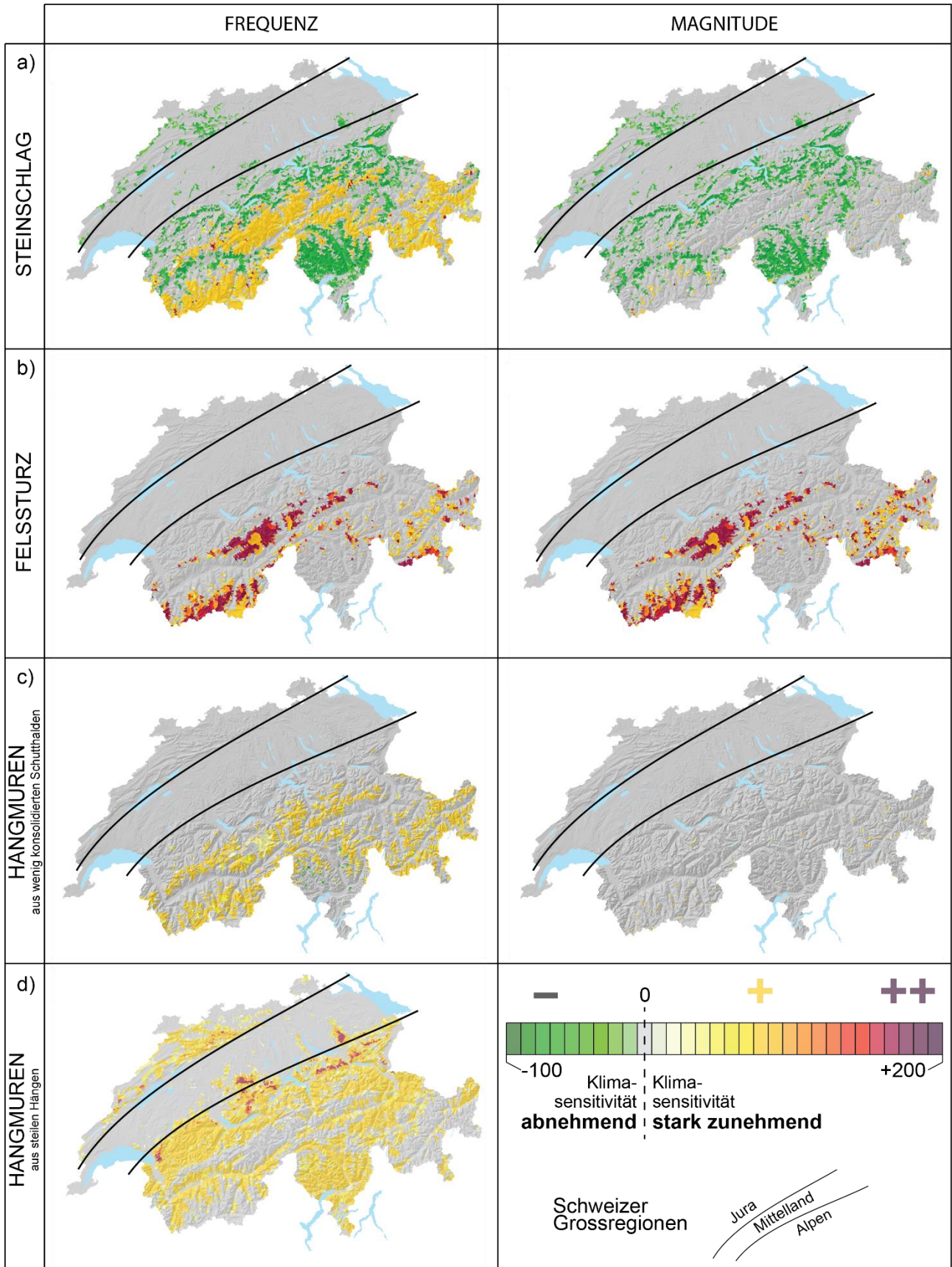


Abb. 9: Klimasensitivität für Steinschlag, Felssturz und Hangmuren berechnet für das mittlere Emissionszenario der CH2011 Klimaszenarien (verändert nach: Mani & Caduff, 2012).

5.3 Murgänge in Gräben und Wildbächen

5.3.1 Prozesse

Murgänge sind ein schnell fließendes Gemisch aus Wasser und einem hohen Anteil an Feststoffen wie Feinmaterial, Steine, Blöcke und organischer Substanz (Holz). Murgänge werden als mehrphasig beschrieben. Auslösende Ereignisse sind meist Starkniederschläge oder auch rascher Wassereintrag durch Schnee- oder Eisschmelze. Dabei vermischen sich Teile von Boden oder Gesteinen mit Wasser. Dadurch kommt es zu einem fluiden Massenstrom. Das Verhältnis zwischen Wasser und solidem Material ist dabei klar bestimmt und Murgänge können somit von Schlammströmen, Rutschungen und Geschiebetransporten unterschieden werden. Murgänge beinhalten bis zu 70 % Feststoff und treten vor allem in steilen Bergregionen in Kombination mit Wildbächen und Einschnitten im Gelände auf. Murgänge wirken flächenhaft, können spontan auftreten und sehr hohe Geschwindigkeiten erreichen was sie zu einer schwer einzuschätzenden Gefahr für Wandernde und für die Wanderwegeninfrastruktur macht (Abb. 7c, Abb. 8e) (BAFU, 2016a; Mani & Caduff, 2012).

In steilen Bergregionen stellen Wildbäche eine besondere Gefahrenquelle dar: Wenn es stark regnet, reißen sie manchmal große und zerstörerische Mengen von Gestein und Erdreich sowie Holz mit sich (Varnes, 1978; Stähli et al., 2015). Gräben und Wildbäche wirken im Transitbereich, also in der Zone zwischen Anriss- und Ablagerungsgebiet, linienförmig bis flächig (Abb. 8b). Wie Murgänge, sind Gräben und Wildbäche eine sehr schwer einzuschätzende Gefahr für Wandernde und für die Wanderwegeninfrastruktur (v.a. auch Brücken).

5.3.2 Erwartete Veränderungen

Für Murgänge spielt vor allem die saisonale Veränderung des Niederschlags eine Rolle. Es kann davon ausgegangen werden, dass im Zuge des Klimawandels generell weniger Sommerniederschlag auftritt, vor allem in den südlichen Landesteilen. Dies führt in den Sommermonaten zu einer voraussichtlichen Reduktion der Häufigkeit von Murgängen und Wildbachprozessen (Mani & Caduff, 2012). In den Übergangsjahreszeiten und in den Wintermonaten ist von einer Niederschlagszunahme und vor allen von häufigeren Starkniederschlägen auszugehen (CH2018, 2018). Dies führt voraussichtlich zu einer Zunahme der Häufigkeit von Murgang und Wildbachprozessen. Aufgrund des zu erwarteten Temperaturanstiegs, spielt die erhöhte Materialverfügbarkeit durch auftauenden Permafrost und der vermehrte Wassereintrag durch einen Anstieg der Schneefallgrenze eine wesentliche Rolle (Kapitel 6) (Stoffel et al., 2014b). Eine

zunehmende Frequenz geht jedoch oft mit einer Abnahme der Magnitude einher. Eine zunehmende Häufigkeit wird vor allem in den voralpinen und alpinen Gebieten erwartet (Abb. 10) (Mani & Caduff, 2012).

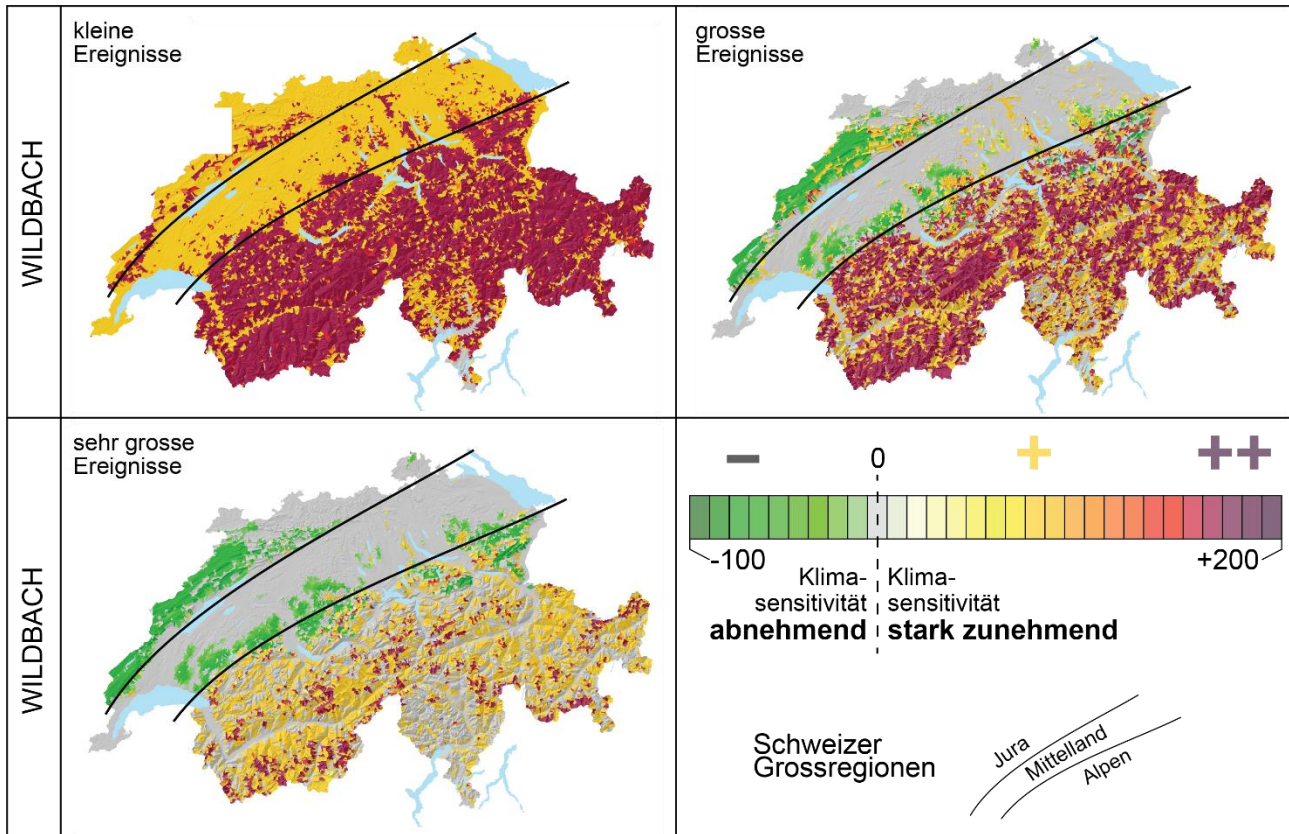


Abb. 10: Klimasensitivität für Wildbachprozesse berechnet für das mittlere Emissionsszenario der CH2011 Klimaszenarien (verändert nach: Mani & Caduff, 2012).

5.4 Hangmuren und Rutschungen

5.4.1 Prozesse

Hangmuren sind gerichtete Massenbewegungen (Abb. 7d, Abb. 8d). Es handelt sich dabei um eine oberflächliche Bewegung von Lockermaterial, Vegetationsbedeckung sowie Bodenmaterial. Hangmuren bilden sich an steilen Hängen. Im Gegensatz zu Rutschungen fehlt bei Hangmuren eine klar definierte Gleitfläche oder Rotationsfläche. Das Volumen von Hangmuren ist auf 20'000 m³ beschränkt. Da der treibende Faktor Wasser ist, können Hangmuren relativ hohe Geschwindigkeiten mit bis zu 10 m/s erreichen und bringen oft Materialverfrachtung mit sich. Dies birgt eine hohe Zerstörungskraft. Sehr oft kommt es zu Mischformen von Hangmuren und anderen Rutschungstypen. In Kombination mit Gerinnen

oder Wildbächen können aus Hangmuren auch Murgänge werden (siehe Kapitel 5.3) (BAFU, 2016a; BAFU, 2016b).

Rotations- oder Translationsrutschungen resultieren meist aus Scherbrüchen und treten in mittel- bis steilen Hängen auf (Abb. 7e & f, Abb. 8 d). Haupttreiber von Rutschungen ist das Wasser, welches den Porenwasserdruck erhöht und somit zu einem Versagen führt. Eine ebenso wichtige Rolle bei der Auslösung kommt dem Quelldruck zu, der beim Aufquellen von Tonmineralen entsteht. Durch genügend Wasser können auch alte passive Rutschungen erneut aktiviert werden. Rotationsrutschungen haben oft ein beschränktes Volumen und bilden sich meist in tonigem oder siltigem Bodenmaterial entlang einer kreisförmigen Gleitfläche aus. Im Gegenzug versagen Translationsrutschungen oft an Schwächezonen wie Schicht-, Kluft- oder Schieferungsflächen im Untergrund. Translations- oder Rotationsrutschungen können zu Hangmuren führen.

Rutschungen werden allgemein nach dem Versagensmechanismus (Gleiten oder Rotieren; siehe oben) und der Tiefe der Gleitfläche klassifiziert. Von oberflächennahen oder flachgründigen Rutschungen spricht man bei einer Tiefe der Gleitfläche bis zu 2 m, von mittelgründigen Rutschungen zwischen 2 m und 10 m und von tiefgründigen Rutschungen bei einer Gleitflächentiefe ab 10 m (BAFU, 2016a; BAFU, 2016b). Langsame Rutschungen stellen für Wandernde aufgrund ihrer verhältnismässig langsamen Geschwindigkeit von einigen Zentimetern pro Jahr meist keine direkte Gefahr dar. Schnelle Rutschungen hingegen, die sich mit bis zu mehreren Metern pro Tag oder schneller bewegen, stellen auch für Wandernde eine schwer einzuschätzende Gefahr dar. Für die Weginfrastruktur stellen beide Typen eine Gefährdung dar. Sind Rutschungen aktiviert, kann es im Gefahrenbereich auch zu Hangmuren oder zum Geländeabbruch kommen, dies gefährdet Wandernde und Wanderweginfrastruktur gleichermassen. Hangmuren und Rutschungen haben eine flächenhafte Wirkung (Abb. 8d).

5.4.2 Erwartete Veränderungen

Hangmuren und Rutschungen sind Prozesse die hauptsächlich durch Wassereintrag und Wassersättigung ausgelöst werden. Somit führt ein Anstieg des Niederschlags und vor allem von langanhaltenden Niederschlagsperioden auch zu einem Anstieg von Hangmuren und Rutschungen (Stoffel et al., 2014b). Betroffen sind vor allem Gebiete deren geologische und geomorphologische Eigenschaften Hangmuren und Rutschungen begünstigen. Eine Zunahme der Frequenz betrifft vor allem die Alpen, Voralpen und die Südschweiz. Wie in Mani und Caduff (2012) beschrieben, sind das höhere Mittelland sowie die Juraregion möglicherweise stark von einer Zunahme der Häufigkeit betroffen (Abb. 9c/d) (Mani & Caduff, 2012).

5.5 Frühlings- und Sommerlawinen

5.5.1 Prozesse

Lawinen, die in den Frühlings- und Sommermonaten entstehen werden umgangssprachlich auch als Frühlings- beziehungsweise Sommerlawinen bezeichnet. Diese können als Schneebrett oder als Lockerschneelawine in höher gelegenen Gebieten anbrechen und sich bis in tiefere Lagen nach unten bewegen. Sommerlawinen sind zwar viel seltener als Lawinen im Winter, fordern aber im Schnitt in der Schweiz ein bis zwei Todesopfer pro Jahr (Schweizer & Techel, 2016). Sie reißen häufig spontan los und lösen sich nach starken Schneefällen, bei Regen oder nach tageszeitlicher Erwärmung. Speziell bei Nassschneelawinen ist der Hauptauslöser flüssiges Wasser in der Schneedecke, welches Bindungen an Schichtgrenzen markant schwächt. Nassschneelawinen erreichen im Vergleich zu anderen Lawinentypen nur geringe Geschwindigkeiten, können aber vor allem im absturzgefährdeten Gelände Wandernde auch in bereits schneefreien Gebieten bedrohen. Eine besondere Gefährdung stellen die genannten Lawinen für die Weginfrastruktur dar, da sie oft Geröll und Holz führen und durch grosse Kräfte die Landschaft stark verändern können. Lawinen sind Naturgefahren mit flächenhafter Wirkung und haben verglichen mit linear wirkenden Prozessen eine höhere räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit. Sommerlawinen werden oft sehr untergeordnet von Wanderern und Bergsteigenden als Gefahr wahrgenommen. Die Gefahr besteht vor allem nach grösseren Schneefällen im Frühling und Sommer, im steilen Gelände und unterhalb von steilen und schneebedeckten Hängen.

Von den in der Schweiz gesamthaft 482 Lawinenunfällen im Zeitraum 1984 bis 2014 geschahen 21 (~ 4 %) in den Sommermonaten Juni bis Oktober, wobei 40 Menschen starben (Pasquier et al., 2016; Schweizer & Techel, 2016). Meist handelte es bei den Opfern um Hochtourengehänger und nicht speziell um Wanderer. Dennoch muss die Gefahr als relevant für Wanderer eingestuft werden. Das SLF stellt nach starken Schneefällen auch im Sommer ein Lawinenbulletin zur Verfügung. Das Risiko kann durch angemessenes Verhalten, wie richtige Tourenplanung und Gefahrenabschätzung massgeblich reduziert werden.

5.5.2 Erwartete Veränderungen

Zur Entwicklung von Sommerlawinen ist keine Literatur bekannt, die einen bestimmten Trend im Zuge des Klimawandels belegt. Der allgemeine Anstieg der Schneefallgrenze und der Durchschnittstemperatur lässt jedoch darauf schliessen, dass Gebiete in denen Sommerlawinen möglich sind, durch den

Temperaturanstieg reduziert werden und es somit allgemein zu weniger Sommerlawinen kommt. Bei Frühlings- und Nassschneelawinen verhält es sich etwas anders, da diese in höher gelegenen Gebieten entstehen und weit bis in schneefreie Gebiete vordringen können. Mit häufigeren Extremereignissen ist in höheren Lagen auch mit einer Zunahme von Nassschneelawinen zu rechnen, in tieferen Lagen jedoch generell mit einer Abnahme (Ballesteros-Canovas et al., 2018; Mani und Caduff, 2012).

6. Auswirkung der Klimaveränderung auf die Kryosphäre und Prozesskaskaden

6.1 Genereller Überblick

Als Kryosphäre wird die Gesamtheit des gefrorenen Wassers (Eis, Schnee und Frost) auf der Erde bezeichnet. In den Alpen sind dies vorwiegend Gletscher, Eis, Schnee und Permafrost sowie saisonal gefrorener Boden. In Bezug auf das Wandern und das Wanderwegnetz spielen insbesondere im Hochgebirge zwei wesentliche Faktoren eine Rolle: (i) Die Klimaveränderung generell, welche ein verändertes Gefahrenpotential bewirkt und (ii) der «Rückzug» der Kryosphäre welcher eine höhere Prozessaktivität der Naturgefahren sowie eine Veränderung der Begehbarkeit des Geländes mit sich bringt (Braun, 2009). Gefahrenprozesse können häufiger und mit stärkerer Intensität auftreten (vgl. Kapitel 5). Dies gilt vor allem für Prozesse die mit der Kryosphäre oder Wasserprozessen, wie beispielsweise mit ausaperndem Eis oder extremen Niederschlägen, in Verbindung stehen (Mani & Caduff, 2012). Die Veränderung der Begehbarkeit des Geländes ist vor allem in den hochalpinen Regionen von Relevanz und betrifft daher insbesondere Alpinwanderwege (~ 1 % des Wanderwegnetzes). An dieser Stelle wird daher für detaillierte Informationen auf die Dissertation von Braun (2009) verwiesen.

Die Kryosphäre wird als «Klimathermometer» bezeichnet, was die Sensibilität der Kryosphäre im Hinblick auf die Erderwärmung sehr deutlich charakterisiert. Eine Veränderung der Kryosphäre hat weitreichende Konsequenzen für Öko- und Prozesssysteme. Betroffen sind neben den heute vereisten Gebieten auch die nachgeschalteten, tiefergelegenen Regionen, was letztlich zu weitreichenden, sozioökonomischen Konsequenzen führen wird (Beniston et al., 2018). Gegen Ende des Jahrhunderts wird durch die Erwärmung der Kryosphäre eine signifikante Veränderung der Landschaft, des hydrologischen Regimes bzw. der Wasservorräte sowie der Infrastruktur erwartet (Beniston et al., 2018), was die Relevanz in Hinblick auf das Wanderwegwesen unterstreicht.

Die Auswirkungen einer Klimaveränderung auf den Schnee wurden bereits in Kapitel 3.3 bzw. Kapitel 5.5 diskutiert. Folgend werden die relevanten Konsequenzen einer Erwärmung auf Gletscher und Permafrost angerissen.

6.2 Gletscher

Gebirgsgletscher sind das zentrale Element um die Auswirkungen einer Klimaveränderung sichtlich zu erfassen. Die Europäischen Alpen haben im Zeitraum 1900 bis 2011 rund 45 % ihrer Gletscherfläche und etwa 50 % ihres Eisvolumens verloren (Huss, 2012). Zwischen den Jahren 2008 und 2011 hatte die Schweiz eine Gletscherfläche von ca. 943 km² mit einem Eisvolumen von ca. 67 km³ (Beniston et al., 2018; Fischer et al., 2014; Huss & Farinotti, 2012). Gemäss Huss (2012) reduziert sich bis Ende des 21. Jahrhunderts die Gletscherfläche im Verhältnis zur Gletscherausdehnung 2003 auf 4 % (RCP8.5) bzw. 18 % (RCP2.6). Das heisst, selbst bei direktem, konsequentem Klimaschutz werden 80 % der Gletscherflächen in den Alpen verschwinden und selbst grosse Talgletscher, wie der Grosse Aletschgletscher, der Rhône Gletscher oder Morteratschgletscher, verlieren bis zu 90 % ihres Eisvolumens (Abb. 11) (Farinotti et al., 2012; Beniston et al., 2018).

Gletscher erodieren Fels und erodieren und / oder akkumulieren Substrat. Durch Erosion formt sich der Gletscher sein eigenes Bett. Talflanken werden dadurch oft übersteilt, durch das Gletschereis jedoch «gestützt». Durch den Gletscherrückzug werden die Talflanken instabil und es kommt zu Massenbewegungen verschiedenster Art (Baumhauer, 2013; Benn & Evans, 2010; Evans & Gooster, 2014; Kos et al., 2016; Gärtner-Roer & Bast, 2019). Verstärkt wird dieser Effekt, wenn durch die Druckentlastung eine starke Zerklüftung des Felsen entsteht, (Schmelz-)Wasser in den Felsen eindringen kann und es zu täglichen oder saisonalen Frostwechseln kommt. Von einer stark erhöhten Frostaktivität ist bei einer Jahresmitteltemperatur von unter -2 °C auszugehen, von einer erhöhten, aber nicht dominierenden Frostaktivität zwischen -2 °C und +3 °C (French, 2017). Oben beschriebene Prozesse können spontane, grosse Ereignisse wie Felslawinen, Felsstürze und Rutschungen oder aber auch kleinere Ereignisse wie beispielsweise Steinschlag auslösen (Fischer et al., 2012). Ebenso wird die Steinschlaggefahr durch das Ausschmelzen von einzelnen Steinen und Blöcken erhöht.

Durch den Gletscherrückzug wird Sediment beispielsweise als Moränen oder Hangschutt freigesetzt. Das neu entstandene Material wird entweder akkumuliert oder aufgrund der geomorphologischen Gegebenheit, wie Geländeform, Hangneigung oder Exposition, umgelagert bzw. transportiert. Im Zusammenhang mit einem erhöhtem Wasserangebot durch Starkniederschläge, Eis- oder Schneeschmelze kann es zu grossen und schnellen Massenbewegungen kommen, wie beispielsweise Murgänge oder Rutschungen, welche das Material in tiefere Regionen transportieren.

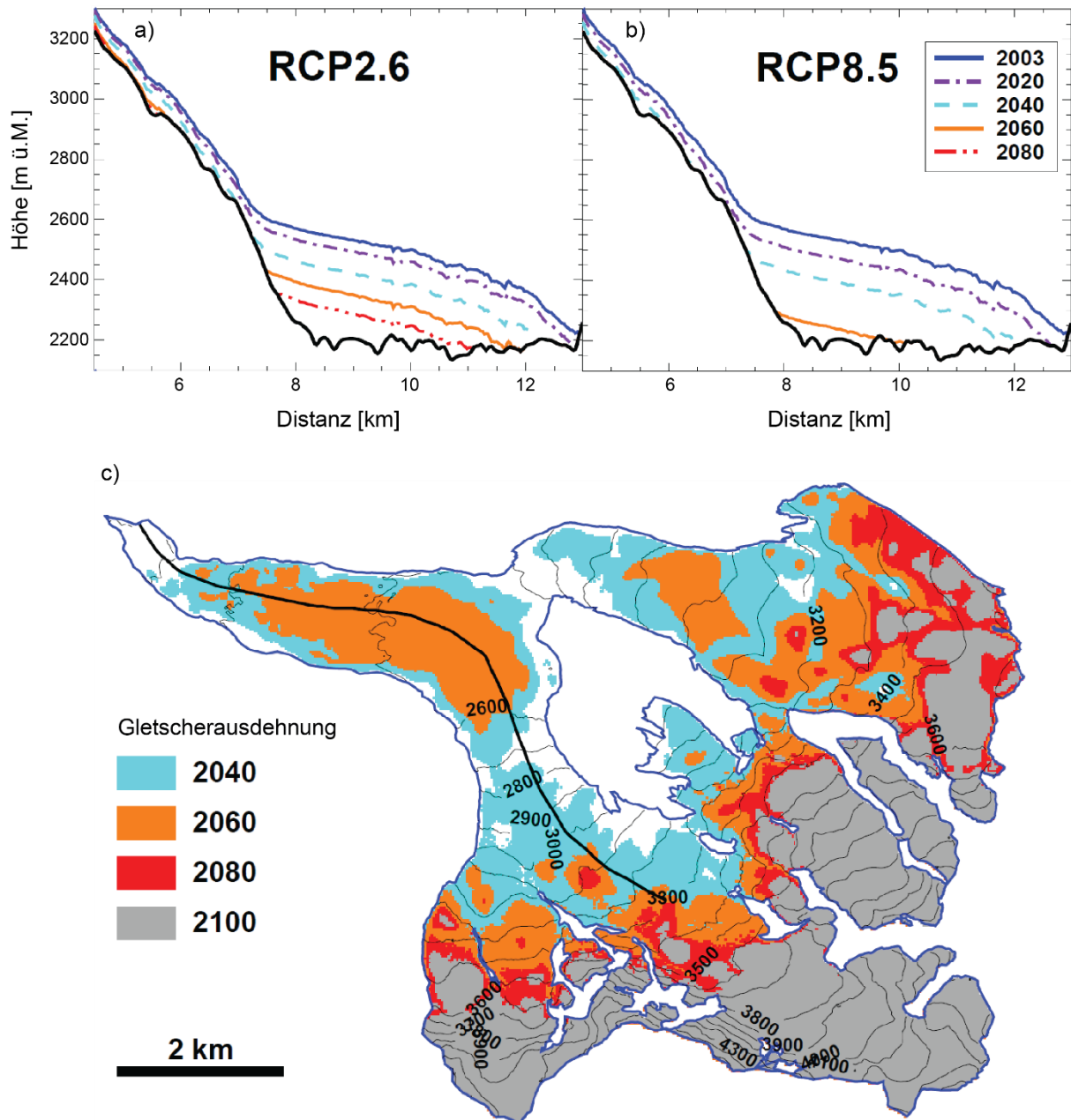


Abb. 11: Simulierte zukünftige Entwicklung eines Schweizer Gletschers am Beispiel des Gornergletschers, Südwestschmelze. Der Gornergletscher ist der zweitgrösste Gletscher der Europäischen Alpen. Gezeigt werden die simulierten Gletscheroberflächen (a & b) entlang der schwarzen Profillinie in (c) für zwei Emissionsszenarien, RCP2.6 und RCP8, und die Jahre 2020, 2040, 2060 sowie 2080. Die blaue Linie zeigt den Stand der Gletscheroberfläche (a & b) im Jahr 2003 bzw. die Gletscherausdehnung in (c). Die räumliche Gletscherausdehnung (c) wurde für ein mittleres Emissionsszenario berechnet (RCP6.0). Die Konturlinien wurden von der Gletscherfläche 2003 abgeleitet (verändert nach: Huss, 2012, Fig. 4).

6.3 Permafrost

Permafrost beschreibt den thermischen Zustand des oberflächennahen Untergrundes. Permafrost ist Lithosphärenmaterial (Boden, Sediment, Fels) das über die Dauer von einem Jahr (Haeberli 1990) bzw. zwei aufeinanderfolgenden Jahren (Everdingen, 1998; French, 2017) Temperaturen unter 0 °C aufweist. In den Schweizer Alpen schätzten Keller et al. (1998) das Permafrostvorkommen auf 4 % bis 6 %. Neueste Modellrechnungen zeigen, dass Permafrost weniger als 3.4 % der Schweizer Landesfläche einnimmt (Kenner et al., 2019). In abgeschatteten Nordhängen tritt eisarmer Permafrost (z. B. in Felswänden) bis etwa 2550 m ü. M. auf, in südexponierten Hängen liegt die Verbreitungsgrenze etwa 350 m höher. Die Verbreitung von eisreichem Permafrost, beispielsweise in Form von Blockgletschern oder eisreichen Schutthalden, hat keine scharfe Grenze, tritt aber am häufigsten zwischen 2500 m ü. M. (NW bis NE) und 2600 m ü. M. (SE bis SW) auf (Kenner et al., 2019).

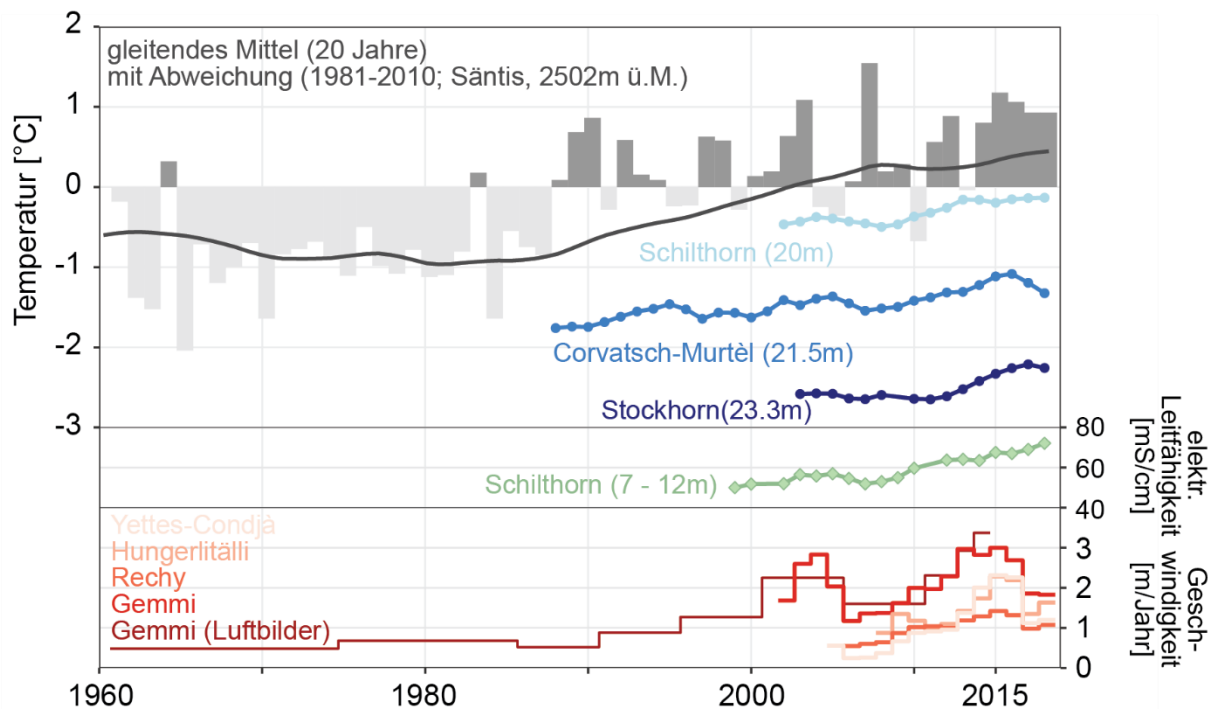


Abb. 12: Entwicklung der Permafrosttemperatur (Jahresmittelwerte) in rund 20m Tiefe der drei PERMOS Bohrlöcher Schilthorn, Corvatsch-Murtèl und Stockhorn (blau) sowie Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit zwischen 7 m und 12 m am Schilthorn (grün) und der Bewegungsgeschwindigkeit von ausgewählten Blockgletschern (rot) im Vergleich zur Entwicklung der Lufttemperaturen (grau) (verändert nach: PERMOS, 2019, Fig. 8.1).

Permafrost ist ein «Klimaprodukt»: Lufttemperatur und Niederschlag sind die beiden dominierenden Existenzfaktoren. Besonders deutlich wird dies bei einem Vergleich zwischen Lufttemperatur und Permafrosttemperatur (Abb. 12): Die drei PERMOS Bohrlöcher am Schilthorn, Corvatsch-Murtèl und

Stockhorn zeigen mit zunehmender Lufttemperatur einen generellen Anstieg der Temperatur in etwa 20 m Tiefe (PERMOS, 2019; Mollaret et al., 2019). Zu erkennen ist aber auch, dass der Anstieg der Untergrundtemperaturen nicht kontinuierlich verläuft (Abb. 12). Standortsspezifische Faktoren, wie Neigung, Exposition, Albedo, Rauigkeit, Schneedecke, Lithologie oder Vegetation, beeinflussen den Energieaustausch zwischen Atmosphäre und dem (oberflächennahen) Untergrund und demnach die Permafrosttemperatur, die Permafrostverbreitung und die Permafrostmächtigkeit. Insbesondere wird dadurch aber auch die Mächtigkeit der sommerlichen Auftauschicht determiniert. Im Hochgebirge wird dies durch die kleinräumige Heterogenität der Permafrostverbreitung deutlich: Innerhalb weniger Meter kann «warmer» (Temperaturen am Gefrierpunkt) neben «kaltem» Permafrost mit einer schwankenden Mächtigkeit der sommerlichen Auftauschicht von ~ 2 m bis ~ 7 m auftreten (Gärtner-Roer & Bast, 2019; Bast, 2009).

Die Permafrostentwicklung kann nicht nur auf Basis von Temperaturmessungen abgeleitet werden. Für flächenhafte Informationen und Prozessstudien sind weitere Methoden wie kinematische Messungen (Fernerkundung) oder geophysikalische Sondierungen unerlässlich (Kneisel et al., 2008; Müller et al., 2014). In der Kombination unterschiedlicher Methoden werden die Veränderungen der letzten Jahre besonders deutlich. So zeigt sich beispielsweise eine Zunahme in den Bewegungsraten von eisreichen Permafrostformen wie Blockgletschern (Abb. 12), eine Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit (Abb. 12) oder eine Zunahme der sommerlichen Auftauschicht insbesondere in Extremjahren sowie eine deutliche Veränderung von Widerständen in geophysikalischen Sondierungen. Es findet eine Permafrostdegradation statt, welche durch wärmere Temperaturen respektive einen ansteigenden Wassergehalt im Permafrostkörper gekennzeichnet ist (PERMOS, 2019; Schoeneich et al., 2015; Mollaret et al., 2019; Hilbich et al., 2011; Hilbich et al., 2008). Physikalische Modelle zeigen, dass dieser Erwärmungstrend bis Ende des Jahrhunderts deutlich zunehmen wird (Abb. 13), was auf die steigenden Lufttemperaturen und eine veränderte Schneedecke zurückzuführen ist (Marmy et al., 2016; Beniston et al., 2018).

Eine Permafrostdegradation in tiefergelegenen sowie eine Erwärmung des Permafrostes in höhergelegenen Regionen werden vermutlich zu Massenbewegungen und Prozessketten mit bisher unbekanntem Ausmass führen (Beniston et al., 2018). Die steigenden Temperaturen sowie die Zunahme der sommerlichen Auftauschicht führen zur Instabilität von Felswänden bzw. Hängen und dadurch zu einer vermutet höheren Frequenz von Murgängen, Felsstürzen und Steinschlägen (Beniston et al., 2018; Etzelmüller, 2013; Stoffel et al., 2014a; Stoffel et al., 2014b; Davies et al., 2001). Davies et al. (2001) zeigten in einem Scherexperiment, dass die Stabilität resp. der Sicherheitsfaktor bei einer Eistemperatur von - 5 °C

signifikant höher ist, als unter eisfreien Verhältnissen. Der Sicherheitsfaktor fällt ab -1.4 °C unter die Versagensgrenze und erreicht sein Minimum bei -0.5 °C . Das heisst, vor allem «warmer» Permafrost, hat eine höhere Instabilität. Dispositionsveränderungen sowie Auslösemechanismen von oben beschriebenen gravitativen Prozessen sind abhängig von der Art des Oberflächenmaterials (Sediment oder Festgestein), seinen Eigenschaften (z.B. Kluftsystem, Risse, Körnung, Eisgehalt etc.) und dessen zeitlicher Variabilität (Beniston et al., 2018; Hasler et al., 2012). Für den Alpenraum wurden über die letzten Jahre zahlreiche Fels- und Hanginstabilitäten registriert und partiell in Datenbanken dokumentiert (Ravel & Deline, 2011; SLF 2019). Einige dieser Ereignisse sind auf Deglaziation zurückzuführen (siehe Kapitel 6.2), andere vermutlich auf Permafrostschwund. Hohe Lufttemperaturen können neben einer Veränderung der Permafrostcharakteristika auch zu erhöhten Mengen an Schmelzwasser führen (Schnee, Gletschereis), welches in das Kluftsystem von Gestein eindringt und dort zu einer Veränderung der Scherparameter führt (Hasler et al., 2012; Beniston et al., 2018). Permafrost verhindert jedoch auch das Eintreten von Wasser in den tieferen Felsen; Wasser gefriert, dehnt sich aus und destabilisiert den Fels. Extremereignisse, wie sie in CH2018 beschrieben werden (vgl. Kapitel 4), können diese thermomechanischen Effekte verstärken.

Alpine Massenbewegungen, welche in direktem Zusammenhang mit Wasser stehen, wie etwa Murgänge, werden sich vermutlich in ihrer Frequenz und Magnitude verstärken (IPCC, 2012; IPCC, 2014). Dieser Anstieg, wird insbesondere ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts erwartet (Stoffel et al. 2014a; Stoffel et al., 2014b).

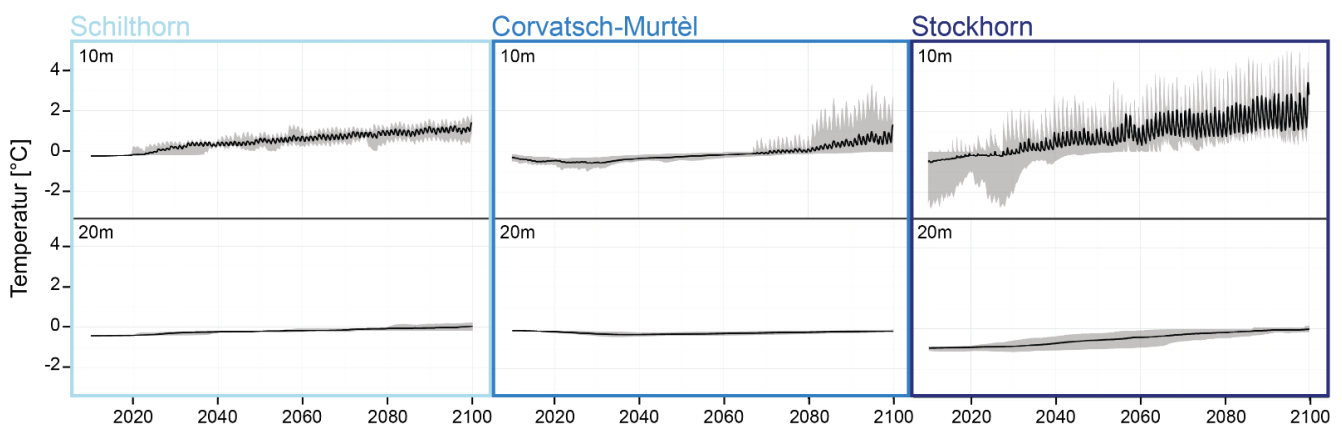


Abb. 13: Simulierte Permafrostentwicklung in 10 m und 20 m Tiefe bis Ende des Jahrhunderts für die PERMOS Bohrlöcher Schilthorn, Corvatsch-Murtèl und Stockhorn. Die schwarze Linie zeigt den Simulationsmedian, der grau schattierte Bereich die Simulationsbandweite (verändert nach: Marmy et al., 2016, Fig. 7)

Während der thermische Zustand von Permafrost bereits gut untersucht wird, bleiben viele Fragen zu potentiellen Eisvorkommen oder zur Permafrosthydrologie offen. Die offenen Fragen stehen somit in unmittelbarem Zusammenhang mit den Auswirkungen einer Erwärmung zu Wasserressourcen sowie zur Hangstabilität durch Permafrostdegradation oder Talikbildung (Talik: permanent ungefrorener Untergrund innerhalb eines Permafrostgebietes) (Etzelmüller, 2013; Beniston et al., 2018).

6.4 Verkettung von Naturgefahren: Prozesskaskaden

Die projizierte Klimaerwärmung modifiziert neben den in Kapitel 5 aufgeführten Veränderungen auch das verfügbare Wasser durch Schnee- und Eisschmelze (Kapitel 4 & 6.1 bis 6.3). Gletscherrückzug führt zur Zerklüftung und Destabilisierung, Permafrostformen oder schuttbedecktes Gletschereis degradieren und erhöhen ihre Fließgeschwindigkeiten, Eis verhindert das Eindringen von Wasser in tiefere Schichten bei gleichzeitig zunehmenden Auftauschichten und thermomechanische Prozesse sorgen für Tau- und Gefrierprozesse im oberflächennahen Untergrund. Während sich Gletscher relativ schnell zurückziehen werden, geht die Degradation von Permafrost deutlich langsamer von statten. Die einstigen und heutigen von Gletscher und Permafrost geprägten Gebiete gingen respektive gehen in Landschaften aus Felsen, Lockersedimenten beziehungsweise Blockschutt, übersteilten Hängen, wenig Vegetation, degradierendem Permafrost und zahlreichen Seen über (Ballantyne, 2002; Haeberli et al., 2017). Es findet eine thermische und mechanische Veränderung im Untergrund statt, eine Interaktion zwischen Atmosphäre und Lithosphäre, welche zu einem Desequilibrium der Geo- und Ökosysteme führt und daher zu einer steigenden Instabilität von Felswänden und Sedimentformen mit weitreichenden Konsequenzen bis zum Talboden. Felssturz, Steinschlag, Murgänge oder Rutschungen sind die Folgen. Hinzu kommen Eislawinen und Eisschlag, *slushflows* (murenähnlicher Sulzstrom von wassergesättigtem Schnee) oder unter gegebenen Umständen kommt es zur Neubildung von Gletscherseen (Haeberli et al., 2017; Haeberli, 2013; Morán-Tejeda et al., 2016).

In aller Regel ist das Auftreten von alpinen Naturgefahren kein singulärer Prozess, sondern eine Aneinanderreihung bzw. eine Verkettung mehrerer Prozesse. Prozesskaskaden katalysieren singuläre Prozesse, reichen von der nivalen / glazialen / periglazialen Zone bis zum Talboden und sind nicht zuletzt das Resultat der hohen Reliefenergie im Alpenraum. Veränderte Umweltbedingungen, führen vermutlich zu einer Beschleunigung solcher Prozesse (Beniston et al., 2018). Prozesskaskaden sind *low probability*,

high impact Ereignisse und sind daher für die Gefahrenprävention generell, aber auch im Hinblick auf Wandernde und das Wanderwegnetz nur schwer zu erfassen.

Mögliche Prozesskaskaden stehen beispielsweise im unmittelbaren Zusammenhang mit Gletscherseen unterhalb von überhängenden Gletschern oder instabilen Felswänden mit Permafrost: Herabbrechende Eismassen, Felsmassen oder ein Gemisch aus beidem in den Gletschersee lösen eine Flutwelle aus, welche Dämme durchbrechen oder überfluten können (GLOF = *glacier lake outburst flood*) und auf dem Weg ins Tal Material mitreissen und letztlich zu Murgängen in Wildbächen werden (Haeberli et al., 2017; Worni et al., 2014). Ein Beispiel eines solchen Sees ist der Oeschinensee oberhalb von Kandersteg respektive unterhalb des Rothornsattels. Der See ist vermutlich postglazial durch einstige Felssturزابlagerungen entstanden und wird heute von steilen Felswänden aus Kalkstein umgeben. In den höheren Lagen befindet sich «warmer» Permafrost mit Temperaturen um den Gefrierpunkt im Felsen und Sedimenten (Haeberli et al., 2017).

Ein deutliches Beispiel einer Prozesskaskade mit grossen Auswirkungen in der jüngsten Schweizer Geschichte ist ein Felssturz, der sich am 23. August 2017 an der Nordwand des Piz Cengalo ereignet hat. Die herabstürzenden Felsmassen haben Gletschereis des Vadrec dal Cengal und Lockersedimente mitgerissen und in der Auslaufzone abgelagert. Aus dem Gemisch aus Felsen, Eis und Sediment gingen mehrere Murgänge hervor, welche in Bondo verheerende Schäden anrichteten (Demmel, 2019). Bis heute ist das Val Bondasca gesperrt. Ein jüngeres Beispiel einer «kleineren» Prozesskaskade ereignete sich am 19. März 2019 am Flüela Wisshorn. Ein Felssturz löste in der Folge eine Schneelawine aus, welche bis zur (geschlossenen) Flüelapassstrasse reichte. Der Anriss liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit im Permafrost; Permafrosteis wurde aber nur wenig gesehen. Auslöser des Felssturzes war vermutlich eine Kombination aus geologischer Struktur sowie instabilen Felsflanken des bereits zurückgezogenen Gletschers. Auch am Flüela Wisshorn sind die querenden Wanderwege bis heute gesperrt.

7 Auswirkung der Klimaveränderung auf den Wald

Der Wald ist ein dynamisches Ökosystem, welches durch das Klima, natürliche Störungen und Landnutzung massgebend gesteuert wird (Bebi et al., 2017). Eine Klimaveränderung wirkt daher direkt oder in Wechselwirkung auf den Wald und zieht mannigfaltige Konsequenzen mit sich (Pluess et al., 2016). Rund 31 % der Schweizer Landesfläche ist bewaldet (BAFU, 2018). Über ein Viertel des Schweizer Wanderwegnetzes verläuft im Wald (vgl. Kapitel 2). Die meisten Menschen besuchen den Wald zur Erholung beziehungsweise sportlichen Zwecken wie beispielsweise zum Wandern oder zum Joggen (BAFU, 2012). Somit betreffen zukünftige Veränderungen im Wald auch das Wanderwesen.

Veränderte Klimabedingungen wie in Kapitel 3 beschrieben (Tab. 1) wirken sich mittel- bis langfristig auf die Waldstruktur und Störungsregimes im Wald aus. Natürliche Störungen, wie Windwurf, Feuer und Insektenkalamitäten (Insektenausbrüche / -verbreitung welche zur «Massenerkrankung» von Waldbeständen führen) haben bereits in den vergangenen Jahrzehnten zugenommen. Ein weiterer Anstieg wird auch für die Zukunft erwartet (Wastl et al., 2013; Seidl et al., 2014; Bebi et al., 2017; Bebi et al., 2019). Steigende Holzvorräte in Kombination mit Winterstürmen und ungefrorenen Böden erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Windwurf (Usbeck et al., 2010). Anhaltende Hitze und Trockenstress sowie die höhere brennbare Biomasse und eine veränderte Schneedecke können vermehrt zu Waldbränden führen (Pezzatti et al., 2016). Höhere Temperaturen und Trockenperioden schwächen gleichzeitig Bäume und beschleunigen so Insektenbefälle auch in höheren Lagen, wie beispielsweise die rasche Entwicklung von Borkenkäfern in Fichtenbeständen. Modellrechnungen zeigen, dass im Mittelland gegen Ende des Jahrhunderts drei, in den Voralpen und im Jura bis zu zwei Generationen des Borkenkäfers pro Jahr angelegt werden können (Jakoby et al., 2016). Der Klimawandel fördert auch weitere Wald- bzw. Baumkrankheiten und Schädlinge (Engesser et al., 2008). So fördert die Trockenheit beispielsweise Rinden- und Wurzelkrankheiten, oder bisher unbeachtete Pilze treten unter dem Einfluss des Klimawandels als Krankheitserreger neu in Erscheinung (Engesser et al., 2008). Mit der Klimaveränderung kann auch von einer regionalen / lokalen Zunahme der jeweiligen Populationsdichten ausgegangen werden. So konnte man beispielsweise beobachten, dass der Dunkle Goldfalter und der Eichenprozessionsspinner in der Nordwest- und Westschweiz oder der Pinienprozessionsspinner in der Südschweiz vermehrt

aufzutreten (Engesser et al., 2008). Ebenso wird erwartet, dass sich invasive Arten, wie der asiatische Laubholzbockkäfer in der Schweiz etablieren (Engesser et al., 2008).

Natürliche Störungen im Wald bringen, wenn auch in den meisten Fällen von den Wandernden im Vorfeld planbar, Gefahr mit sich und können zu einer flächenhaften Beschädigung des Wanderwegnetzes führen. Langanhaltende Insektenbefälle können unter Umständen dazu führen, dass Wanderwege im Wald grossflächig und über längere Zeiträume gesperrt bzw. speziell ausgewiesen werden müssen.

Knapp die Hälfte des Schweizer Waldes ist als Schutzwald klassifiziert (Losey & Wehrli, 2013). Etwa 85 % des Schutzwaldes wendet Gerinneprozesse ab, das heisst, dass deutlich weniger Material durch Murgänge, (Hang)Muren oder Ufererosion durch die Wurzelverstärkung in die Gerinne gelangen. Etwa 24 % des Schutzwaldes schützt vor Hangmuren und (flachgründigen) Rutschungen, 19 % vor Lawinen und etwa 8 % vor Stein- und Blockschlag (Rigling & Schaffer, 2015). Da sich der Wald ständig wandelt, verändert sich auch dessen Disposition gegenüber Naturgefahren wie Lawinen, Steinschlag und flachgründigen Rutschungen / Hangmuren oder Bodenerosion (Bebi et al., 2016; Bebi et al., 2019). Neben obengenannten Störungsregimen (Wind, Insekten, Feuer) führen anhaltende Hitze bzw. Hitzeperioden und Trockenstress zu einer erhöhten Baummortalität und folglich mittel- bis langfristig zu einer reduzierten Schutzleistung des Waldes, da höhere Anpassungs- und Regenerationsfähigkeit die verminderte Schutzleistung auf Dauer nicht ausgleichen können (Bebi et al., 2016; Bebi et al., 2017; Etzold et al., 2017).

Ein häufigeres Auftreten von natürlichen Störungen sowie langanhaltender Trockenstress führen daher zu einer verminderten Schutzleistung des Waldes und einer erhöhten Disposition der oben genannten Naturgefahren mit entsprechenden Konsequenzen für Wandernde aber vor allem auch für das Wanderwegnetz (siehe Kapitel 5). Andererseits trägt der Klimawandel dazu bei, dass sich an kältelimitierten Standorten in höheren Lagen der Wald flächig ausbreitet und dichter wird. Die Schutzwirkung verbessert sich demnach an solchen Standorten, insbesondere in offenen Wäldern höherer Lagen (Bebi et al., 2016; Bebi et al., 2017).

8 Synthese mit Ausblick

Wandern ist eine der beliebtesten Freizeitaktivitäten der Schweiz. In den letzten Jahren zeichnet sich generell ein «Bergsportboom» ab. So ist es nicht verwunderlich, dass die Schweiz auf über 65'000 km Länge ein sehr hochwertiges Wanderwegnetz, bestehend aus Wanderwegen, Bergwanderwegen und Alpinwanderwegen, erhält. Alle drei Wegkategorien werden von Wandernden genutzt und lediglich 15% der Wandernden nutzen ausschliesslich die «Wanderwege». Ein Grossteil der Wandernden ist demnach im Alpenraum unterwegs und knapp 44 % des Schweizer Wanderwegnetzes verläuft durch die drei Gebirgskantone Graubünden, Bern und Wallis. Derzeit sorgen die Wanderwegverantwortlichen für die Sicherheit der Wandernden, indem sie die Planung, den Bau und den Unterhalt des Wanderwegnetzes vorausschauend anpassen.

Die bodennahe Lufttemperatur der Schweiz hat in den letzten 150 Jahren signifikant zugenommen. Der Temperaturanstieg liegt zudem deutlich über dem globalen Mittel. Die neuesten Schweizer Klimaszenarien CH2018 machen deutlich, dass selbst bei konsequentem Klimaschutz die Schweizer Jahresmitteltemperatur gegenüber dem Bezugszeitraum 1981 bis 2010 zwischen 0.7 °C und 1.9 °C bis zur Mitte des Jahrhunderts ansteigen wird. Die Prognose variiert regional sowie saisonal und die Erwärmung beeinflusst weitere Klimaindikatoren. So werden für die Schweiz trockenere Sommer, heftigere Niederschläge, mehr Hitzetage und schneeärmere Winter erwartet. Diese Veränderung des Klimas beeinflusst auch das Wandern. Beispielsweise wird die Wandersaison länger oder Menschen fahren in die Berge um die zunehmenden Hitzetage und den «aufgeheizten» städtischen Gebieten zu entfliehen. Zusammen mit der oben beschriebenen Entwicklung des Wanderns, kann also spekuliert werden, dass zukünftig das Wanderwegnetz durch mehr Wandernde über einen längeren Zeitraum im Jahr genutzt wird.

Wandernde setzen sich insbesondere auf Bergwanderwegen und Alpinwanderwegen Naturgefahren aus (Abb. 14; Tab. 3). Doch nicht nur auf Wandernde haben Naturgefahren einen Einfluss, sondern auch auf die Wanderwegeninfrastruktur. Es gibt zwar Gefahren, welche Wandernde durch vorausschauende Tourenplanung vermeiden können, die Infrastruktur aber dennoch massgeblich verändern bzw. zerstören können. Hierzu gehören beispielsweise meteorologische Gefahren oder Hochwasser und Überschwemmungen. Gravitative Naturgefahren werden dagegen aufgrund der Spontanität und der Intensität des Prozesses für die Gefahrenprävention als auch für die Weginfrastruktur als relevant eingestuft. Insbesondere im Alpenraum, welcher durch eine komplexe und heterogene Topographie sowie eine hohe Reliefenergie geprägt ist, spielen alpine Massenbewegungen eine zentrale Rolle. Somit

reagieren die Naturgefahren in den Alpen empfindlicher gegenüber Klimaveränderung. Dies hat Auswirkungen auf das dort vielbegangene Wanderwegnetz. Die relevanten Naturgefahren respektive Prozesse sind (i) Sturzprozesse (Steinschlag, Blockschlag, Felssturz, Bergsturz), (ii) Murgänge und Wildbachprozesse, (iii) Hangmuren und Rutschungen sowie (iv) Frühlings- und Sommerlawinen. Es ist zu beachten, dass die Prozesse oft ineinander übergehen respektive (polygenetische) Mischformen entstehen. Das Auftreten alpiner Naturgefahren wird durch die Klimaveränderung verändert. Gemäss der Klimasensitivitätsstudie von Mani & Caduff (2012) findet eine Veränderung vor allem im alpinen und hochalpinen Gebieten statt. Insbesondere in den Alpen hat der Klimawandel zudem einen weiteren, sehr grossen Einfluss: Höhere Temperaturen erwärmen die Kryosphäre was zu einer thermischen und mechanischen Veränderung im (oberflächennahen) Untergrund führt. Felssturz, Steinschlag, Murgänge oder Rutschungen sind die Folgen. Kryosphärenveränderungen finden primär im Hochalpin statt. Direkt betroffen sind daher zumeist die hochgelegenen Bergwanderwege und Alpinwanderwege. Die Auswirkungen der Kryosphärenveränderungen betreffen jedoch auch die tiefergelegenen Regionen und Prozesskaskaden können Folgen bis zum Talboden mit sich ziehen. Das heisst, indirekt können auch die tiefergelegenen Bergwanderwege und Wanderwege massgeblich durch eine Veränderung der Kryosphäre beeinflusst werden.

Knapp über ein Viertel des Schweizer Wanderwegnetzes verläuft durch Waldgebiet. Natürliche Störungen wie Windwurf oder Waldbrände können nicht nur eine Gefahr für Wandernde und Wanderweginfrastruktur darstellen, sondern im Fall von Schutzwäldern auch die Schutzwirkung des Waldes gegenüber Steinschlag, Lawinen oder flachgründigen Rutschungen und Hangmuren herabsetzen und zu einer möglichen Erhöhung des Gefahrenpotentials führen. Langanhaltende Insektenbefälle können unter Umständen bewirken, dass Wanderwege im Wald grossflächig und über längere Zeiträume gesperrt bzw. speziell ausgewiesen werden müssen.

Die Wanderwegverantwortlichen wollen auch in Zukunft den Wandernden grösstmögliche Sicherheit bieten. Die Anpassung und Entwicklung von Strategien für das Wanderwegwesen der Zukunft ist von elementarer Bedeutung. Sie wird durch das Zusammenspiel und der Interaktion aus Wandern, Klimaveränderung und (alpinen) Naturgefahren gebildet (Abb. 14). Fragen nach (i) Anpassung des Sicherheitsniveaus durch Verantwortliche und Entscheidungsträger, (ii) Eigenverantwortung der Wandernden, (iii) einer möglichen Erfassung und Abschätzung des Risikos und (iv) politischen und touristischen Entscheidungen und Entwicklungen werden dabei eine zentrale Rolle spielen.

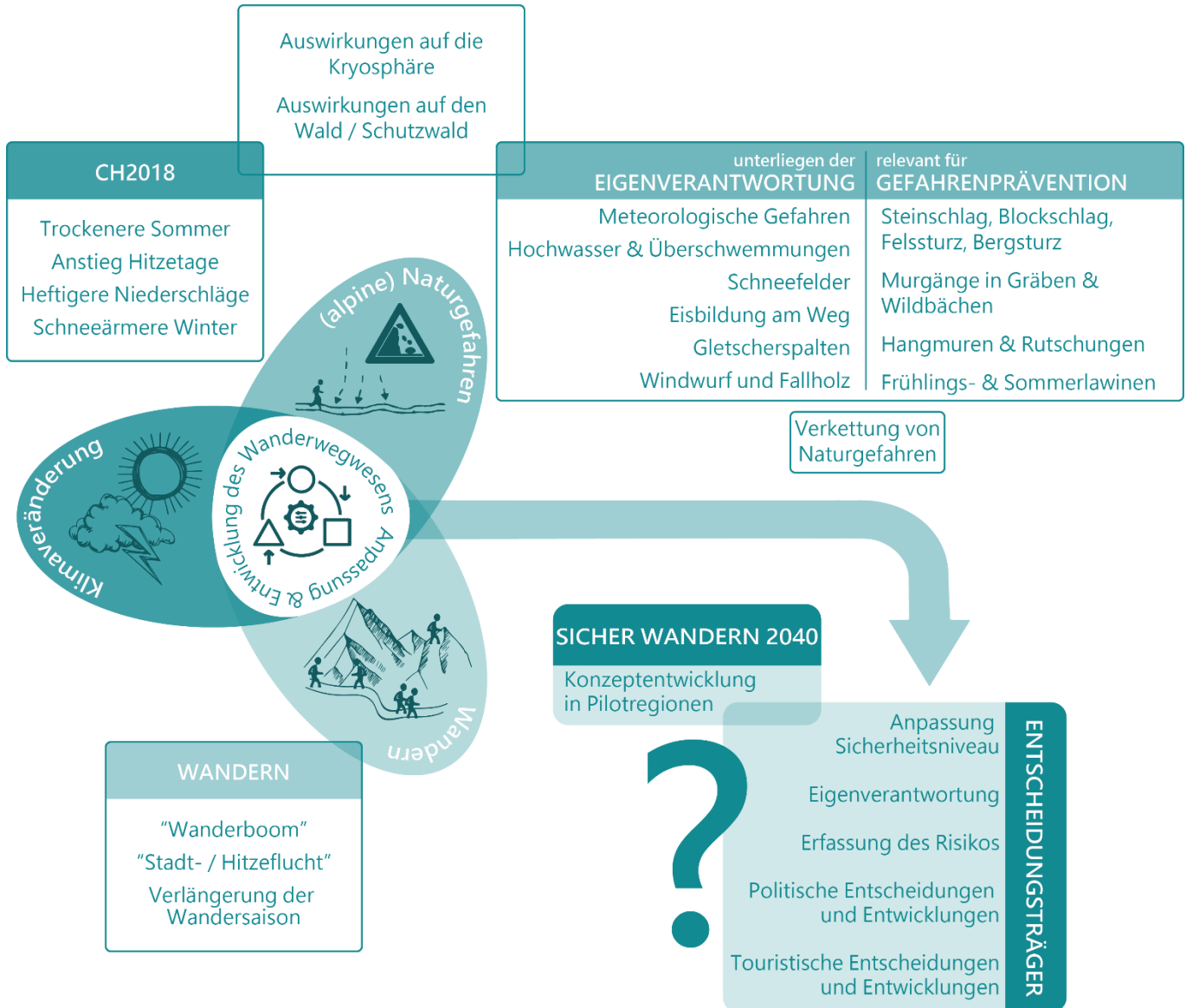


Abb. 14: Syntheseabbildung. Die Anpassung und Entwicklung von Strategien für das Wanderwegwesen der Zukunft wird durch das Zusammenspiel und der Interaktion aus Wandern, Klimaveränderung und (alpinen) Naturgefahren gebildet.

Das Projekt «Sicher Wandern 2040» hat sich zum Ziel gesetzt, einen Massnahmenkatalog auf Basis der vorliegenden Literatursynthese und weiteren Untersuchungen in drei Pilotregionen zu entwickeln. Tabelle 3 (Anhang A; S. 50) versucht hier eine zusammenfassende Grundlage zu bieten indem ein schweizweiter Überblick zu Naturgefahren, möglichen zukünftigen Veränderungen, den betroffenen Regionen und Wanderwegkategorien sowie etwaigen Erwartungen an das Wanderwegwesen dargestellt werden. Entsprechend der groben Auflösung der Tabelle müssen in einem nächsten Schritt lokale und regionale Studien erhoben (Pilotstudien / Pilotregionen; vgl. Kapitel 1.1) werden und im weiteren Projektverlauf sukzessive integriert werden.

9 Literaturverzeichnis

- Abegg, B., Steiger, R. & Walser, R. (2013): Herausforderung Klimawandel Chancen und Risiken für den Tourismus in Graubünden. Qualitätsprogramm, Graubünden, Chur; Bergbahnen Graubünden, Lantsch / Lenz: 72 S.
- Abrahamsen, Y., Hälgi, F., Rathke, D. A., Sarferaz, D. S. & Sturm, P. D. J.-E. (2019): Prognosen für den Schweizer Tourismus. KOF Studien, Nr. 134: 15 S.
- BAFU (2012): Die Schweizer Bevölkerung und ihr Wald. Ergebnisse der zweiten Bevölkerungsumfrage Waldmonitoring soziokulturell (WaMos 2). Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Wald, Bern.
- BAFU (2016a): Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern., Umwelt-Vollzug Nr. 1608: 98 S.
- BAFU (2016b): Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz, Bundesamt für Umwelt, Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 12.4271 Darbellay vom 14.12.2012: 120 S.
- BAFU (2018): Jahrbuch Wald und Holz 2018. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1830: 106 S.
- Ballantyne, C. K. (2002): Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Reviews*, 21: 1935-2017.
- Ballesteros-Canovas, J. A., Trappmann, D., Madrigal-Gonzalez, J., Eckert, N. & Stoffel, M. (2018): Climate warming enhances snow avalanche risk in the Western Himalayas. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 115 (13): 3410-3415.
- Baumhauer, R. (2013): Physische Geographie. 1. Geomorphologie. WBG, Wiss. Buchges. Darmstadt: 151 S.
- Bast, A. (2009): Kleinräumige Permafrostverbreitung in einem alpinen Gletschervorfeld, Val Murgal / Oberengadin, Schweiz. Diplomarbeit, Universität Würzburg: 271 S.
- Bebi, P., Bugmann, H., Lüscher, P., Lange, B. & Brang P. (2016): Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In: Pluess, A.R., Augustin, S. & Brang, P. (Hrsg.): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien: 269-286.
- Bebi, P., Seidl, R., Motta, R., Fuhr, M., Firm, D., Krumm, F., Conedera, M., Ginzler, C., Wohlgemut, T. & Kulakowski, D. (2017): Changes of forest cover and disturbance regimes in the mountain forests of the Alps. *Forest Ecology and Management*, 388: 43-56.
- Bebi, P., Bast, A., Ginzler, C., Rickli, C., Schöngrunder, K. & Graf, F. (2019): Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 170: 318-325.
- Begert, M., Schlegel, T. & Kirchhofer, W. (2005): Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. *International Journal of Climatology*, 25(1): 65-80.

- Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., Fantini, A., Giacomoni, F., Hauck, C., Huss, M., Huwald, H., Lehning, M., López-Moreno, J. I., Magnusson, J., Marty, V., Morán-Tejeda, E., Morin, S., Naaim, M., Provenzale, A., Rabatel, A., Six, D., Stötter, J., Strasser, U., Terzago, S., & Vincent, C. (2018): The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12: 759-794.
- Benn, D. I. & Evans, D. J. A. (2010): *Glaciers and Glaciation*. Hodder Education. 2nd Edition. Taylor & Francis Group, London: 816 S.
- Braun, F. (2009): Sommer-Bergtourismus im Klimawandel: Szenarien und Handlungsbedarf am Beispiel des hochalpinen Wegnetzes. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien: 156 S.
- Bründl, M., Romang, H. E., Bischof, N. & Rheinberger, C. M. (2009): The risk concept and its application in natural hazard risk management in Switzerland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9: 801-813.
- Bundesamt für Strassen ASTRA & Schweizer Wanderwege (2017): Leitfaden Gefahrenprävention und Verantwortlichkeit auf Wanderwegen: 100 S.
- CCAMM (2020): WSL Forschungsprogramm Climate Change Impacts on Alpine Mass Movements (ccamm.wsl.ch); letzter Zugriff: 05. Februar 2020.
- CH2011 (2011): *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*. C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zürich: 88 S.
- CH2014-Impacts (2014): *Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland*. OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern: 136 S.
- CH2018 (2018): *CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland*. Technical Report. National Centre for Climate Services, Zurich: 271 S.
- CORDEX (2019): www.cordex.org; letzter Zugriff: 09. Oktober 2019.
- Davies, M. C. R., Hamza, O. & Harris, C. (2001): The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12: 137-144.
- Demmel, S. (2019): *Water Balance in Val Bondasca. Initial hydrological conditions for debris flows triggered by the 2017 rock avalanche at Pizzo Cengalo*, MSc Thesis Swiss Federal Institute of Technology Zürich (ETH), Zürich: 43 S.
- Dicks, U. & Neumeyer, E. (2010): *Deutscher Wanderverband (DWV) - Grundlagenuntersuchung Freizeit- und Urlaubsmarkt Wandern*: 144 S.
- EconoMe Consortium (2019): *EconoMe 5.0. Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren*. Bründl, M., Zaugg-Ettlin, L., Burkard, A., Oggier, N., Winkler, C., Dolf, F., Gauderon, A., Salz, M., Krummenacher, B., Gutwein, P., Hauser, M., Baumann, R., Loup, B., Nigg, U., Gertsch-Gautschi, E., Schertenleib, A.. EconoMe Objektparameter Tabelle: <https://econome.ch/ecowork/temp/doku>, Objekte 1558890663.pdf; letzter Zugriff: 01. September 2019.

- Etzel Müller, B. (2013): Recent Advances in Mountain Permafrost Research. *Permafrost and Periglacial Research*, 24: 99-107.
- Engesser, R., Forster, B., Meier, F. & Wermelinger, B. (2008): Forstliche Schadorganismen im Zeichen des Klimawandels. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 159: 344-351.
- Etzold S., Wunder, J., Braun, S., Rohner, B., Bigler, C., Abegg, M. & Rigling, A. (2017): Mortalität von Waldbäumen: Ursachen und Trends. In: Pluess, A.R., Augustin, S. & Brang, P. (Hrsg.): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien: 269-286.
- Evans, D. & Gooster, L. (2014): Glacial Land systems. Taylor & Francis, London: 544 S.
- Everdingen, E. (1998): Multi-Language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms: In Chinese, English, French, German, Icelandic, Italian, Norwegian, Polish, Romanian, Russian, Spanish, and Swedish: 159 S.
- Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., Bauder, A. & M. Funk (2012): Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes*, 26: 1909-1924.
- Fehlmann, D. (2016): Dynamics of rockfall hazard and risk from past to future: a case study in Täsch (VS), Switzerland. MSc Thesis. Universität Zürich: 99 S.
- Fischer, L., Purves, R. S., Huggel, C., Noetzi, J. & Haeberli, W. (2012): On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12: 241-254.
- Fischer, M., Huss, M., Barboux, C. & Hoelzle, M. (2014): The New Swiss Glacier Inventory SGI2010: Relevance of Using High-Resolution Source Data in Areas Dominated by Very Small Glaciers. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 46: 933-945.
- Fischer, A., Lamprecht, M & Stamm, H. (2015): Wandern in der Schweiz. Sekundäranalyse von «Sport Schweiz 2014» und Befragung von Wandernden in verschiedenen Wandergebieten. Materialien Langsamverkehr Nr. 131. Im Auftrag von Bundesamt für Strassen und Schweizer Wanderwege, Lamprecht & Stamm Sozialforschung und Beratung AG, 2015: 112 S.
- French, H. M. 2017. The Periglacial Environment. 3rd Edition. John Wiley & Sons, West Sussex: 458 S.
- FWG (1996): Bundesgesetz über Fuss- und Wanderwege vom 04. Oktober 1985 (Stand am 01. April 1996), 704: 6 S.
- Gärtner-Roer, I. & Bast, A. (2019): (Ground) Ice in the Proglacial Zone. In: Heckmann, T. & Morche, D. (Hrsg.): Geomorphology of Proglacial Systems. Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes. Springer Series, Geography of the Physical Environment, Springer Verlag, Cham: 85-98.
- Giorgi, F., Jones, C. & Arsar, G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *WMO Bulletin*, 58: 175-183.
- Gottwald, A. (2016): Warum wandern plötzlich alle?. *Neue Zürcher Zeitung*, NZZ.

- Haeberli, W. (1990): Permafrost. In: Vischer, D. (Hrsg.): Schnee, Eis und Wasser der Alpen in einer wärmeren Atmosphäre. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich (VAW), Zürich: 71-88..
- Haeberli, W. (2013): Mountain permafrost — research frontiers and a special long-term challenge. *Cold Regions Science and Technology*, 96: 71-76.
- Haeberli, W., Schaub, Y. & Huggel, C. (2017): Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in deglaciating mountain ranges. *Geomorphology*, 293: 405-417.
- Hasler, A., Gruber, S. & Beutel, J. (2012): Kinematics of steep bedrock permafrost. *Journal of Geophysical Research*, 117: 17 S.
- Henne, P. D., Bigalke, M., Büntgen, U., Colombaroli, D., Conedera, M., Feller, U., Frank, D., Fuhrer, J., Grosjean, M., Heiri, O., Luterbacher, J., Mestrot, A., Rigling, A., Rössler, O., Rohr, C., Rutishauser, T., Schwikowski, M., Stampfli, A., Szidat, S., Theurillat, J.-P., Weingartner, R., Wilcke, W. & Tinner, W. (2018): An empirical perspective for understanding climate change impacts in Switzerland. *Regional Environmental Change*, 18: 205-221.
- Highland, L. M. & Bobrowsky, P. (2008): The landslide handbook – A guide to understanding landslides. Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325: 129 S.
- Hilbich, C., Fuss, C. & Hauck, C. (2011): Automated Time-lapse ERT for Improved Process Analysis and Monitoring of Frozen Ground. *Permafrost and Periglacial Processes*, 22: 306-319.
- Hilbich, C., Hauck, C., Hoelzle, M., Scherler, M., Schudel, L., Völksch, I., Vonder Mühl, D. & Mäusbacher, R. (2008): Monitoring mountain permafrost evolution using electrical resistivity tomography: A 7-year study of seasonal, annual, and long-term variations at Schilthorn, Swiss Alps. *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*, 113(F01S90): 12 S.
- Huss, M. (2012): Extrapolating glacier mass balance to the mountain-range scale: the European Alps 1900–2100. *The Cryosphere*, 6: 713-727.
- Huss, M. & Farinotti, D. (2012): Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of Geophysical Research*, 117, F04010: 10 S.
- IPCC (2012): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Qin, D., Dokken, D. J., Ebi, K. L., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G.-K., Allen, S. K., Tignor, M. & Midgley, P. M. (Hrsg). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA: 582 S.
- IPCC (2014): Climate Change (2014): Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R. & White, L. L. (Hrsg.): Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA: 1132 S.

- Jakoby, O., Stadelmann, G., Lischke, H. & Wermelinger B. (2017): Borkenkäfer und Befallsdisposition der Fichte im Klimawandel. In: Pluess, A.R., Augustin, S. & Brang, P. (Hrsg.): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien: 269-286.
- Prinz, H. & Strauss, R. (2012): Ingenieurgeologie. 5. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg: 738 S.
- Keller, F., Frauenfelder, R., Hoelzle, M., Kneisel, C., Lugon, R., Phillips, M., Reynard, E. & Wenker, L. (1998): Permafrost map of Switzerland. Seventh International Conference on Permafrost, Yellowknife, Canada: 557 – 562.
- Kenner, R., J. Noetzli, M. Hoelzle, H. Raetzo & Phillips, M. (2019): Distinguishing ice-rich and ice-poor permafrost to map ground temperatures and ground ice occurrence in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 13: 1925-1941.
- Klein, G., Vitasse, Y., Rixen, C., Marty, C., & Rebetez, M. (2016): Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, 139(3-4): 637-649.
- Kneisel, C., Hauck, C., Fortier, R. & Moorman, B. (2008) Advances in geophysical methods for permafrost investigations. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19: 157-178.
- Kos, A., Amann, F., Strozzi, T., Delaloye, R., von Ruetten J. & Springman S. (2016): Contemporary glacier retreat triggers a rapid landslide response, Great Aletsch Glacier, Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 43: 466 - 474.
- Köllner, P., Gross, C., Schächli, B., Füssler, J., Lerch, J. & Nause, M. (2017): Klimabedingte Risiken und Chancen. Eine schweizweite Synthese. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1706: 148 S.
- Körner, C. (2003): Alpine Plant Life: functional plant ecology of high mountain ecosystems. Springer, Berlin, Heidelberg: 349 S.
- 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.
- Lamprecht, M., Fischer, A. & Stamm, H.P. (2014): Sport Schweiz 2014: Sportaktivität und Sportinteresse der Schweizer Bevölkerung. Magglingen, Bundesamt für Sport BASPO: 56 S.
- Losey, S. & Wehrli, A. (2013): Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern: 29 S.
- Mani, P. & Caduff, U. (2012): Klimasensitivität Naturgefahren Teil 1 und Teil 2: Methodenbericht und Ergebnisse, Geo7 Bern.
- Marmy, A., Rajczak, J., Delaloye, R., Hilbich, C., Hoelzle, M., Kotlarski, S., Lambiel, C., Noetzli, J., Phillips, M., Salzmann, N., Staub, B. & Hauck, C. (2016): Semi-automated calibration method for modelling of mountain permafrost evolution in Switzerland. *The Cryosphere*, 10: 2693 -2719.
- Mollaret, C., Hilbich, C., Pellet, C., Flores-Orozco, A., Delaloye, R. & C. Hauck (2019): Mountain permafrost degradation documented through a network of permanent electrical resistivity tomography sites. *The Cryosphere*, 13: 2557-2578.
- Morán-Tejada, E., López-Moreno, J. I., Stoffel, M. & Beniston, M. (2016): Rain-on-snow events in Switzerland: Recent observations and projections for the 21st century. *Climate Research*, 71: 111-125.

- Müller, J., Gärtner-Roer, I., Thee, P. & Ginzler, C. (2014): Accuracy assessment of airborne photogrammetrically derived high-resolution digital elevation models in a high mountain environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 98: 58-69.
- NCCS (2018): CH2018 - Klimaszenarien für die Schweiz. National Center for Climate Services NCCS, Zürich: 24 S.
- PERMOS (2019): Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2017/2018. In: Noetzli, J., C. Pellet & B. Staub. (Hrsg.): Glaciological Report Permafrost of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences: 104 S.
- OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkung auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC and ProClim, Bern: 172 S.
- Pasquier, M., Hugli, O., Kottmann, A. & Techel, F. (2016): Avalanche Accidents Causing Fatalities: Are They Any Different in the Summer?. *High Altitude Medicine & Biology*, 18: 67-72.
- Pezatti, G.B., De Angelis, A. & Conedera, M. (2017): Potenzielle Entwicklung der Waldbrandgefahr im Klimawandel. In: Pluess, A.R., Augustin, S., Brang, P. (Hrsg.): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien: 269-286.
- Pluess, A.R., Augustin, S. & Brang, P. (Hrsg.) (2016): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern & Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. Haupt, Bern, Stuttgart, Wien: 447 S.
- Ravel, L. & Deline, P. (2011): Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the Little Ice Age. *The Holocene*, 21: 357-365.
- Rigling, A., Schaffer, H.P. (Hrsg.) (2015): Forest Report 2015. Condition and Use of Swiss Forests. Federal Office for the Environment, Bern. Swiss Federal Institute WSL, Birmensdorf: 144 S.
- Schweizer Alpen Club. (2019): Bergnotfälle Schweiz 2018, Zahlen und Auswertungen. <https://www.alpinerettung.ch/portrait/publikationen/die-bergnotfall-statistik/>; letzter Zugriff 02. Oktober 2019.
- Schoeneich, P., X., Bodin, T., Echelard, V., Kaufmann, A., Kellerer-Pirklbauer, J.-M., Krysiacki & Lieb, G. K. (2015): Velocity Changes of Rock Glaciers and Induced Hazards. Springer International Publishing, Cham: 223-227.
- Schweizer Tourismus Verband (2018): Schweizer Tourismus in Zahlen 2017 Struktur- und Branchendaten. Bern: 60 S.
- Schweizer Wanderwege (2011): Kenngrößen des Schweizer Wanderwegnetz, GIS Auswertung 2011. Wichtigste Ergebnisse: 26 S.
- Schweizer, J. & Techel, F. (2017): Lawinenunfälle Schweizer Alpen Zahlen und Fakten der letzten 20 Jahre. *Magazin Bergundsteigen*, 98: 5 S.
- Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Rammer, W. & Verkerk, P. J. (2014): Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change*, 4: 806-810.
- Serquet, G. & Rebetez, M. (2011). Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change. *Climatic Change*, 108: 291-300.

- SLF (2019): <https://www.slf.ch/de/permafrost/permafrost-und-naturgefahren/felsstuerze-im-permafrost.html>;
letzter Zugriff: 02. Oktober 2019
- SN 640 829a (2006): Schweizer Norm Strassensignale, Signalisation Langsamverkehr. Schweizer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich: 55 S.
- Stähli M., Graf C., Scheidl C. Wyss C. R. & Volkwein, A. (2015): Experimentelle Erkundung von Wildbächen, Murgängen, Hangrutschungen und Steinschlag: Aktuelle Beispiele der WSL. *Geographica Helvetica*, 70: 1–9.
- Stoffel, M., Mendlik, T., Schneuwly-Bollschweiler, M. & A. Gobiet, J. C. C. (2014a): Possible impacts of climate change on debris-flow activity in the Swiss Alps. *Climate Change*, 122: 141-155.
- Stoffel, M., Tiranti, D. & Huggel, C. (2014b): Climate change impacts on mass movements — Case studies from the European Alps. *Science of The Total Environment*, 493: 1255-1266.
- Usbeck, T., Wohlgemuth, T., Dobbertin, M., Pfister C., Bürgi, C. & Rebetez, M. (2010): Increasing storm damage to forests in Switzerland from 1858 to 2007. *Agriculture and Forest Meteorology*, 150: 47-55.
- Wastl, C., Schunk, C., Lupke, M., Cocca, G., Conedera, M., Valese, E. & Menzel, A. (2013): Large-scale weather types, forest fire danger, and wildfire occurrence in the Alps. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168: 15-25.
- Worni, R., Huggel, C., Clague, J. J., Schaub, Y. & Stoffel, M. (2014) Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective. *Geomorphology*, 224: 161-176.
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J. (Hrsg.): Landslides, Analysis and Control. Special Report, 176: Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, D. C.: 11-33.

Anhang A

Tab. 3: Schweizweiter Überblick zu Naturgefahren, möglichen zukünftigen Veränderungen, betroffenen Regionen und Wanderwegkategorien sowie etwaigen Erwartungen an das Wanderwegwesen.

Tab. 3: Schweizweiter Überblick zu Naturgefahren, möglichen zukünftigen Veränderungen, betroffenen Regionen und Wanderwegkategorien sowie etwaigen Erwartungen an das Wandwegwesen.

Prozess / Naturgefahr / System	Kapitel	Ursachen für eine mögliche Veränderung	mögliche Veränderungen	"Prozessraum"	betroffener Naturraum / Region	Höhenstufe	Wanderwegkategorie	Saison	Aspekt Wanderwegwesen	Bemerkungen
Sturz; Stein- und Blockschlag; Fels- und Bergsturz	5.2	Starkniederschlag / langanhaltender Niederschlag; Temperaturanstieg; Permafrostdegradation, Gletscherrückzug, saisonale Frostaktivität;	Zunahme Klimasensitivität von Frequenz und Magnitude im (hoch)alpinen Gelände; gleichbleibend bis abnehmend ausserhalb des (hoch)alpinen Terrains;	alle Hänge, Fels und Lockergestein; Gebiete mit ungünstiger geomorphologischer / geologischer Disposition (z.B. Klüftung, morphologische Härte des Gesteins etc.);	in allen Grossregionen der Schweiz möglich; glaziale, periglaziale und paraglaziale Gebiete sind von möglichen Veränderungen besonders betroffen; bisher betroffene "Problemgebiete"; vgl. Abb. 9a;	Aussage über Höhenstufe aufgrund der Heterogenität nicht möglich; betrifft alle Höhenstufen mit entsprechender Disposition; insbesondere ist die Hochgebirgsstufe betroffen (ab ca. 1'500 m ü. M.);	alle Wanderwegkategorien betroffen; insbesondere Bergwanderwege und Alpinwanderwege;	ganzjährig;	Infrastruktur und (Personen)Sicherheit; Planung, Bau, Unterhalt, Betrieb, Kontrolle, Information, Sensibilisierung, Monitoring, Dokumentation;	Es ist weniger zu erwarten, dass neue Gefahrenquellen entstehen;
Murgänge in Gräben und Wildbächen	5.3	Wassereintrag (Niederschlag / Starkniederschlag / langanhaltender Niederschlag, Schmelzwasser); erhöhte Materialverfügbarkeit durch Permafrostdegradation / Gletscherrückzug (vgl. Kryosphäre, Kapitel 6)	mögliche Zunahme von Frequenz und Magnitude; zunehmende Frequenz kann mit einer abnehmenden Magnitude einhergehen;	steile Bergregionen; Einschnitte im Gelände (Gräben, Wildbäche); Gebiete mit entsprechender Materialverfügbarkeit (Sedimente);	in allen Grossregionen der Schweiz möglich; Klimasensitivität von kleinen Ereignissen schweizweit zunehmend, von grossen Ereignissen v.a. im Alpenraum, aber auch Mittelland und Jura, von sehr grossen Ereignissen v.a. in höher gelegenen Bereichen des Alpenraums; vgl. Abb. 10;	Aussage über Höhenstufe aufgrund der Heterogenität nicht möglich; betrifft alle Höhenstufen mit entsprechender Disposition; grösse des Ereignisses ist zu beachten;	alle Wanderwegkategorien betroffen v.a. bei kleinen Ereignissen; insbesondere Bergwanderwege und Alpinwanderwege bzgl. grösseren Ereignissen;	ganzjährig; insbesondere Winter, Herbst und Frühjahr; in Sommer vermutlich Reduktion der Häufigkeit (aber: Starkniederschläge möglich);	Infrastruktur und (Personen)Sicherheit; Planung, Bau, Unterhalt, Betrieb, Kontrolle, Information, Sensibilisierung, Monitoring, Dokumentation;	Kombination mit Hangmuren / Rutschungen möglich;
Hangmuren und Rutschungen	5.4	Wassereintrag; Niederschlag / langanhaltender Niederschlag / Starkniederschlag; Schmelzwasser kann ggf. dazu beitragen, spielt aber eher untergeordnet eine Rolle;	mögliche Zunahme von Frequenz und Magnitude; zunehmende Frequenz kann mit einer abnehmenden Magnitude einhergehen;	mittelsteile bis steile Hänge; Einschnitte im Gelände; Gebiete mit ungünstiger Materialverfügbarkeit und geomorphologischer / geologischer Disposition; bei flachgründigen Rutschungen ist Vegetationsbedeckung von Bedeutung;	in allen Grossregionen der Schweiz möglich; Frequenzzunahme v.a. in Alpen, Voralpen und Jura; vgl. Abb. 9c/d);	Aussage über Höhenstufe aufgrund der Heterogenität nicht möglich; betrifft alle Höhenstufen mit entsprechender Disposition;	alle Wanderwegkategorien betroffen; insbesondere Bergwanderwege;	ganzjährig; insbesondere Winter, Herbst und Frühjahr; Starkregen / langanhaltender Niederschlag im Sommer;	Infrastruktur und (Personen)Sicherheit; Planung, Bau, Unterhalt, Betrieb, Kontrolle, Information, Sensibilisierung, Monitoring, Dokumentation;	optimale Schutzwälder / Waldstrukturen können hier eine wichtige Rolle bzgl. der oberflächennahen Boden- / Hangstabilität (flachgründige Rutschungen) spielen (Kapitel 7); Hangmuren können aus flachgründigen Rutschungen hervorgehen; Rutschungen ist zu beachten;
Frühlings-, Sommerlawinen	5.5	Schnee, Regen auf Schnee, tageszeitliche Erwärmung;	Einschätzung sehr schwierig und mehrere Szenarien möglich: Abnahme von Frequenz und Magnitude (Entwicklung der Nullgradgrenze), aber auch mögliche Zunahme durch vermehrte Niederschläge in Winter und Übergangszeiten (Nullgradgrenze und Nassschnee);	mittelsteile bis steile Hänge; Einschnitte im Gelände;	Gebiete mit ausreichendem Schneefall; insbesondere Alpen und Voralpen; Lawinen reichen bis in tiefere Lagen / Täler;	Aussage über Höhenstufe aufgrund der Heterogenität nicht möglich; betrifft alle Höhenstufen mit entsprechender Disposition; Generell ist vor allem der Alpenraum betroffen, aber auch Teile des Mittellandes / Voralpen;	alle Wanderwegkategorien betroffen, insbesondere Bergwanderwege;	Frühjahr und Sommer (im Hochgebirge);	Infrastruktur und (Personen)Sicherheit; Planung, Bau, Unterhalt, Betrieb, Kontrolle, Information, Sensibilisierung, Monitoring, Dokumentation;	"Regen auf Schnee Ereignisse"; Lawinen können bis ins Tal reichen; Problematik, dass Wanderwege in tiefergelegenen Bereichen geöffnet sind, jedoch zur gleichen Zeit in höher gelegenen Gebieten eine Lawinenbildung möglich ist; optimale Schutzwälder / Waldstrukturen können eine wichtige Rolle spielen;
Auswirkungen auf die Kryosphäre	6.1, 6.2 & 6.3	Temperaturanstieg; Schmelzwasser; Niederschlagswasser;	Rückzug der Gletscher; Temperaturerhöhung im Permafrost; Bereitstellung von Sedimenten, übersteilte Talflanken; Destabilisierung von Felswänden; Veränderungen der sommerlichen Auftauschicht;	Gebiete mit Gletscher und Permafrostvorkommen;	glazial und periglaziale Gebiete (Gletschervorfelder, Fels/Felswände, Blockgletscher); insbesondere ist der Alpenraum betroffen;	Alpenraum ab ca. 1'800 m ü. M.; Permafrost in Felswänden ab ca. 2'500 m ü. M., Blockgletscher und eisreiche Schutthalten v.a. bei ca. 2'500 m ü. M.; lokale, sporadische Permafrostvorkommen können deutlich tiefer liegen (ca. 1'700 m ü. M.)	alle Wanderwegkategorien betroffen; insbesondere Bergwanderwege und Alpinwanderwege;	ganzjährig; Auftau- / Schmelzphase vor allem im Sommer / Spätsommer / Frühherbst;	Infrastruktur und (Personen)Sicherheit; Planung, Bau, Unterhalt, Betrieb, Kontrolle, Information, Sensibilisierung, Monitoring, Dokumentation;	Veränderungen der Kryosphäre stehen im Zusammenhang mit weiteren Prozessen / Naturgefahren sowie Prozesskaskaden (siehe unten) als auch einer Veränderung der Begebarkeit des Geländes; insbesondere die Temperaturerhöhung im Permafrost ist kritisch zu sehen; zudem ist Permafrost die "unsichtbare Schicht" der Kryosphäre und daher sehr schwierig zu erfassen;
Verkettung von Naturgefahren / Prozesskaskaden	6.4	Verkettung verschiedener Prozesse / Prozessabläufe und dadurch mögliche Erweiterung des Ausmasses; alle oben beschriebenen Prozesse / Auswirkungsbereiche spielen hier zusammen resp. greifen ineinander;	keine Aussage zu treffen; vielfältige Veränderungen möglich; Ein häufigeres Auftreten solcher verketteter Ereignisse ist vorstellbar;	können in allen Bereichen mit Naturgefahren auftreten;	können in allen Grossregionen auftreten; Auftreten wird insbesondere im Alpenraum erwartet (Kryosphäre);	Aussage über Höhenstufe aufgrund der Heterogenität nicht möglich; betrifft alle Höhenstufen mit entsprechender Disposition; insbesondere ist wohl eher die Hochgebirgsstufe betroffen (ab ca. 1'500m);	alle Wanderwegkategorien betroffen;	ganzjährig;	Infrastruktur und (Personen)Sicherheit; Planung, Bau, Unterhalt, Betrieb, Kontrolle, Information, Sensibilisierung, Monitoring, Dokumentation;	sehr schwer erfassbar; «low probability - high impact»;
Auswirkungen auf den Wald / Schutzwald	7	Temperaturanstieg und damit verbundene Auswirkungen (z.B. ungefrorener Boden als Ursache bei Windwurf; Temperatur / Trockenheit / Hitze bei Waldbränden, Baum mortalität etc.);	Zunahme von Störungen (Windwurf, Waldbrände, Insektenkamalitäten); Anstieg der Waldgrenze;	können im gesamten Waldgebiet auftreten; Schutzwaldfunktionen v.a. in mittelsteilen bis steilen Hängen und Geländeeinschnitten (gravitative Naturgefahren);	betroffen ist der Wald aller Grossregionen;	Waldgrenze (1'600m bis 2'300m) (Körner, 2003);	insbesondere sind Bergwanderwege (Schutzwald) und Wanderwege (Schädlinge / Krankheiten) betroffen;	ganzjährig;	Infrastruktur und (Personen)Sicherheit; Planung, Bau, Unterhalt, Betrieb, Kontrolle, Information, Sensibilisierung, Monitoring, Dokumentation;	Herabsetzung des Schutzpotentials (gravitative Massenbewegungen); jedoch Zunahme der Stabilität in höheren Lagen; Waldgrenzen variieren lokal und regional sehr stark;