



Im Auftrag des
Bundesamtes für Umwelt (BAFU)
Abteilung Gefahrenprävention
3003 Bern

Naturgefahren und Klimawandel in der Schweiz: Stand des Wissens

Bericht

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)
Abteilung Gefahrenprävention

CH-3003 Bern

Auftragnehmer und Autoren

geo7 AG, geowissenschaftliches Büro
Dr. Catherine Berger
Maike Schneider
Peter Mani

Neufeldstrasse 5 – 9, 3012 Bern
Tel. +41 (0)31 300 44 33

Begleitung BAFU

Dr. Gian Reto Bezzola
Roberto Loat
Stéphane Losey
Carolin Schärpf
David Siffert

Hinweis

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Änderungskontrolle

Version	Datum	Name	Bemerkungen
1.0	09.06.2020	Maike Schneider Catherine Berger	Definitive Version

Anmerkungen zum Dokument

Erstellt mit Microsoft Office Word, Version 2010

Dateiname \\geo7\data\3000_projekte\4049_bafu_gep_ng_klima\05_bearbeitung\bericht\4049_be01a_scm_ng_klima.docx

Dateigrösse 13929 KBytes

geo7-Bericht

Technische Änderungen vorbehalten

© Copyright 2020 by geo7 AG, Bern/Switzerland

Konzeption und Design: geo7 AG, Bern

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Zielsetzung und Abgrenzung	1
1.3	Aufbau des Berichts	1
2	Untersuchungsmethodik	2
2.1	Vorgehen und Konzept	2
2.2	Untersuchte Literatur	8
3	Grundlagen Klimaszenarien	9
3.1	Globale Klimaszenarien	9
3.2	Regionale Klimamodelle	10
3.3	Klimaszenarien für die Schweiz.....	12
3.4	Weitere wissenschaftliche Erkenntnisse von Bedeutung	15
3.5	Einzelne weitere Klimagrundlagen.....	16
4	Studien zum Impact des Klimawandels auf gravitative Naturgefahren.....	18
4.1	Studien mit grosser Relevanz.....	18
4.2	Studien mit mittlerer Relevanz	35
4.3	Studien mit geringer Relevanz	47
5	Stand des Wissens – Synthese der untersuchten Literatur	54
5.1	Übersicht über alle untersuchten Studien.....	54
5.2	Fokus auf die zentralen Studien.....	59
5.3	Stand des Wissens – Kurzübersicht.....	60
6	Erkenntnisse.....	63
6.1	Bestehende Unsicherheiten	64
6.2	Empfehlungen für Forschung und Praxis.....	71
6.3	Empfehlungen für die Massnahmenplanung.....	73
6.4	Anerkennung der bestehenden Strategie des Bundes	78
6.5	Methodische Erkenntnisse.....	78
7	Ausblick – aktuelle und künftige Herausforderungen	80
7.1	Herausforderungen in Bezug auf den vorliegenden Bericht.....	80
7.2	Herausforderungen im allgemeinen Umgang mit dem Klimawandel	81
7.3	Schlusswort.....	82

Studien zum Impact des Klimawandels auf gravitative Naturgefahren – Übersicht

Erläuterungen siehe Kapitel 2.1.1

2 1 3 Studien mit grosser Relevanz

Allgemeine Informationen, nicht massnahmenspezifisch

Akademie der Wissenschaften Schweiz (2016): Brennpunkt Klima Schweiz [17]

ARGE GEOTEST AG, geo7 AG (2015) [15] [16] und AG NAGEF (2015): GHKperiGlazial [14]

BAFU (2012): CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf das Wasser [19]

Beniston et al. (2018): The European mountain cryosphere [24]

geo7 (2015): Klimasensitivität Naturgefahren [29] [30]

Prudent-Richard et al. (2008): Changements climatiques dans les Alpes [50]



Massnahmenspezifische Studien

BAFU (2017): Impulse für eine klimaangepasste Schweiz [20]

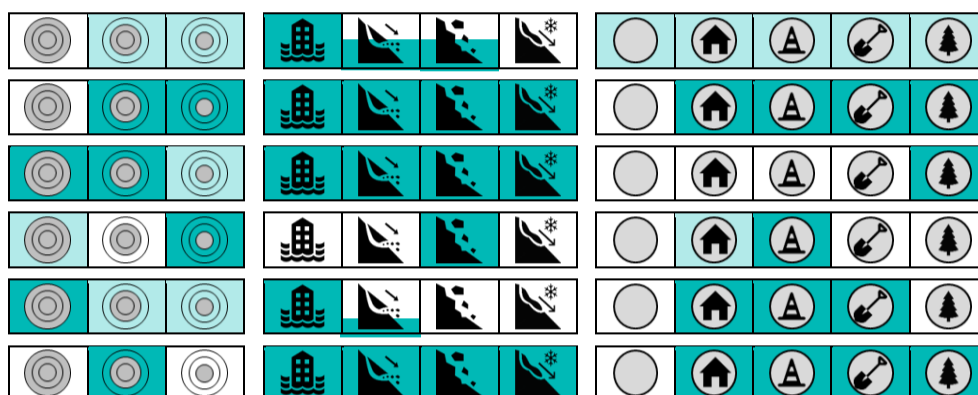
Bättig et al. (2011): Anpassung an die Klimaänderung im Berggebiet [22]

Bebi et al. (2016): Auswirkungen Klimawandel auf Schutzwald und Naturgefahren [23]

Kenner und Phillips (2017): Fels- und Bergstürze in Permafrost Gebieten [36] [37]

KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf Hochwasserschutz in der Schweiz [38]

Nausser (2016): Das Wallis angesichts des Klimawandels [44]



2 1 3 Studien mit mittlerer Relevanz

AG NAGEF (2010): Fakten & Szenarien zum Klimawandel & Naturgefahren im Kt. Bern [13]

BABS (2019): Starkniederschläge und Einsatzplanung Schutz & Rettung Zürich [18]

Brunner et al. (2019): Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions [25]

geo7 (2017): Gefahrenbeurteilung Fellbach – Prozess Wasser [31]

geo7 AG (2019): Klimasensitivität Naturgefahren. Pilotprojekt Val d'Hérens [32]

Gobiet et al. (2014): 21st century climate change in the European Alps [33]

Köplin (2012): Hydrological impacts of climate change in Switzerland during the 21st c. [39]

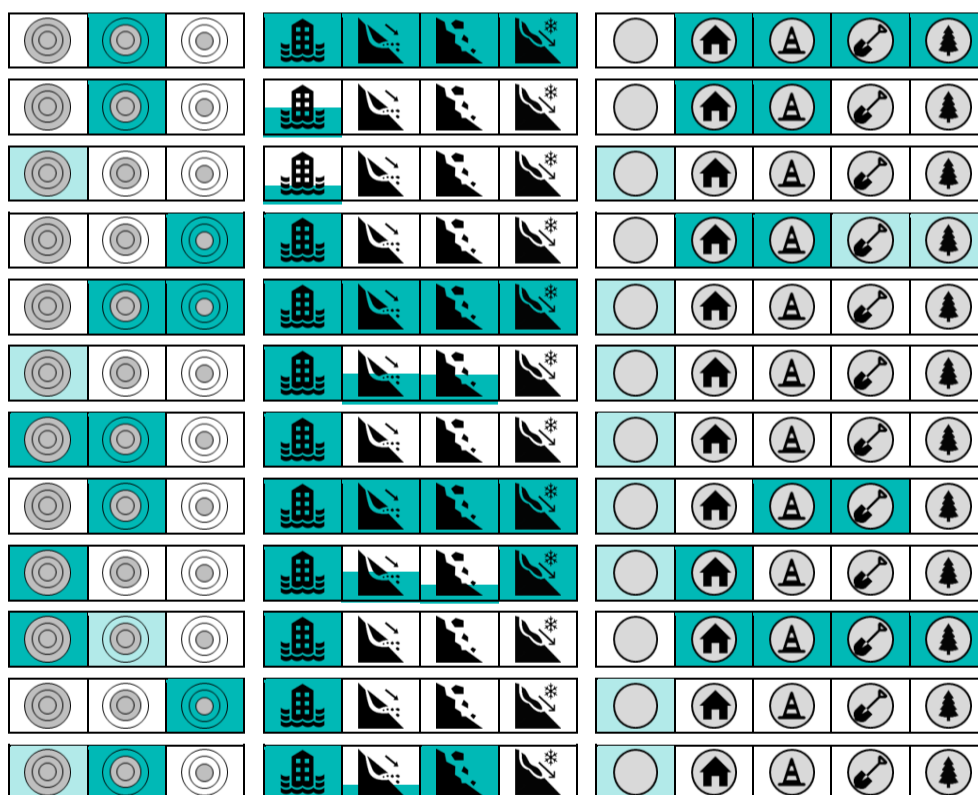
Marty et al. (2009): Klimaänderung und Naturgefahren in Graubünden [41]

OcCC (2003): Extremereignisse und Klimaänderung [45]

OcCC und ProClim (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050 (CH2007) [46]

Ragettli et al. (2020): Climate change impacts on summer flood frequencies [51]

Stoffel et al. (2014): Climate change impacts on mass movements [53]



2 1 3 Studien mit geringer Relevanz

Einhorn et al. (2015): Climate change and Natural Hazards in the Alps [26]

Horton et al. (2006): Climate-change impacts on alpine discharge regimes [35]

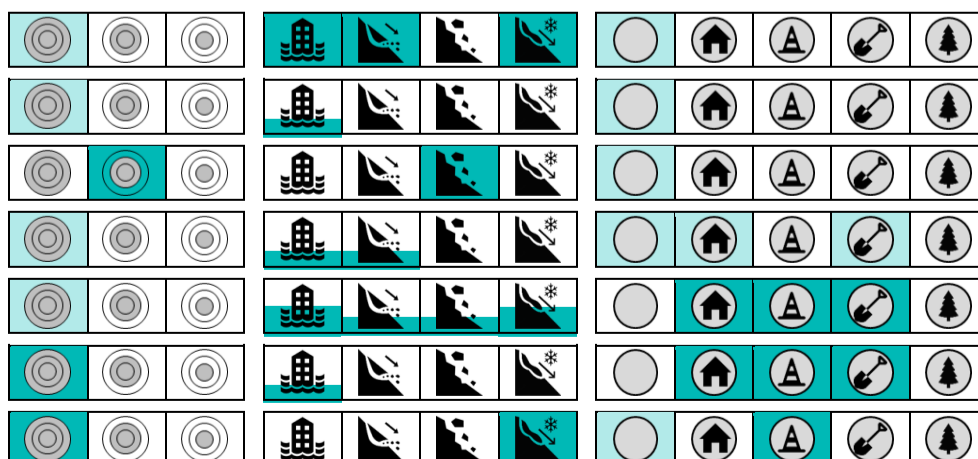
Messenzehl et al. (2017): Regional-scale controls on spatial activity of rockfalls [42]

MeteoSchweiz & PLANAT (2007): Klimaänderung & Naturkatastrophen in der Schweiz [43]

OECD (2007): Climate Change in the European Alps [47]

Perroud und Bader (2013): Klimaänderung in der Schweiz [48]

Pielmeier et al. (2013): Wet snow avalanche activity in the Swiss Alps [49]



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Der Klimawandel und dessen Auswirkungen betreffen unterschiedliche Bereiche der Gesellschaft. Im Alpenraum war die Erwärmung seit dem späten 19. Jahrhundert rund doppelt so stark wie im globalen Mittel, und der Natur- und Kulturraum der Schweiz ist in vielfältiger Weise mit Veränderungen konfrontiert. Verändert sich das Klima, dann betrifft dies auch die gravitativen Naturgefahren. Dies ist eine der grössten Herausforderungen des Klimawandels für die Schweiz. Artikel 8 des CO₂-Gesetzes legt fest, dass der Bund Aktivitäten zur Anpassung an den Klimawandel koordiniert und Massnahmen zur Verbesserung der Wissensgrundlagen ergreift. [17] Es muss also ein Umgang mit den veränderten Umweltbedingungen gefunden werden. Für das Bundesamt für Umwelt BAFU/Abteilung Gefahrenprävention bedeutet dies unter anderem, dass eine konsolidierte Haltung für den Umgang mit den Herausforderungen des Klimawandels festgelegt werden muss. Basierend auf dieser Grundhaltung können Empfehlungen für die Umsetzung in der Verwaltung und Praxis erarbeitet und abgegeben werden.

1.2 Zielsetzung und Abgrenzung

Jede Strategie basiert auf Wissen, und das BAFU hat die Aufgabe, die für strategische Überlegungen und Entscheidungen erforderlichen Grundlagen verfügbar zu machen. [19] Ziel des vorliegenden Berichts ist es, einen Überblick über die aktuell vorhandenen Studien zum Zusammenhang zwischen Klimawandel und Naturgefahren in der Schweiz zu geben. Diese Zusammenstellung soll eine Basis liefern für weiterführende Abklärungen und sie soll dem BAFU als Grundlage dienen für die Formulierung von Handlungsempfehlungen zum künftigen Umgang mit gravitativen Naturgefahren in der Schweiz.

Im vorliegenden Bericht werden fachliche Studien zum Klimawandel und Naturgefahren in der Schweiz aus der Perspektive von Fachexperten (geo7 AG und BAFU) untersucht. Die Zusammenstellung gibt einen strukturierten Überblick über die wichtigsten fachlichen Studien, die in den letzten ca. 10 Jahren zu diesem Thema verfasst wurden. Die Studien werden zusammengefasst, einheitlich präsentiert und miteinander verglichen. Der Fokus liegt dabei auf dem thematischen Vergleich der Studien (auf welcher räumlichen Skala wurden welche Prozesse betrachtet und welche Massnahmen angesprochen, siehe Kapitel 2), nicht jedoch auf deren detaillierten Inhalten. Der Bericht ist demnach eine thematische Zusammenstellung aber keine inhaltliche Zusammenfassung des heutigen Wissensstands zu Naturgefahren und Klimawandel in der Schweiz.

Untersucht wurden naturwissenschaftliche Erkenntnisse (siehe Kapitel 2.2). Bereits erarbeitete Strategien (z.B. Umgang mit Risiken aus Naturgefahren PLANAT [63]) und gesetzliche Grundlagen (z.B. Wasserbaugesetz) werden nicht berücksichtigt.

1.3 Aufbau des Berichts

Die methodischen Grundlagen des vorliegenden Berichts sind in Kapitel 2 aufgeführt. Darin wird auch die untersuchte Literatur, welche den „Stand des Wissens“ zu Klimawandel und Naturgefahren in der Schweiz abbilden soll, beschrieben. Basis für alle Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels sind Klimaszenarien. Die unterschiedlichen verfügbaren und für die untersuchten Studien relevanten Klimagrundlagen werden in Kapitel 3 miteinander verglichen. Die Inhalte der relevanten untersuchten Studien werden im Kapitel 4 präsentiert. Kapitel 5 fasst den "Stand des Wissens" thematisch grob zusammen. Die sich daraus ergebenden Erkenntnisse werden schliesslich in Kapitel 6 präsentiert. Speziell werden verschiedene mögliche Unsicherheitsquellen und die daraus abgeleiteten Empfehlungen für die Planung von Schutzmassnahmen besprochen. Kapitel 7 zeigt zum Abschluss ausgewählte bestehende und künftige Herausforderungen in Bezug auf den vorliegenden Bericht als auch auf die allgemeine Betrachtung des Klimawandels auf.

2 Untersuchungsmethodik

Ziel des vorliegenden Berichts ist es, einen systematischen Überblick über die in der Fachliteratur aus den letzten ca. 10 Jahren behandelten Themen zum Zusammenhang zwischen Naturgefahren und dem Klimawandel in der Schweiz zu geben. Im Folgenden werden das hierfür verwendete Konzept und die untersuchte Literatur vorgestellt.

Der Klimawandel wird deutlich an der Veränderung der wichtigsten Klimaindikatoren wie Temperatur, Niederschlag und Extremereignissen. Diese Klimaindikatoren wiederum beeinflussen den Naturraum, wo etliche Veränderungen sichtbar werden z.B. beim Rückgang der Gletschervolumina, Permafrostdegradation, Zunahme der Wassertemperatur von Seen und Gewässern etc. Eine besondere Herausforderung für die Schweiz ist der Umgang mit sich verändernden gravitativen Naturgefahren, die zum einen direkt durch die Klimaindikatoren und zum anderen durch Änderungen im Naturraum beeinflusst werden (Abbildung 1).

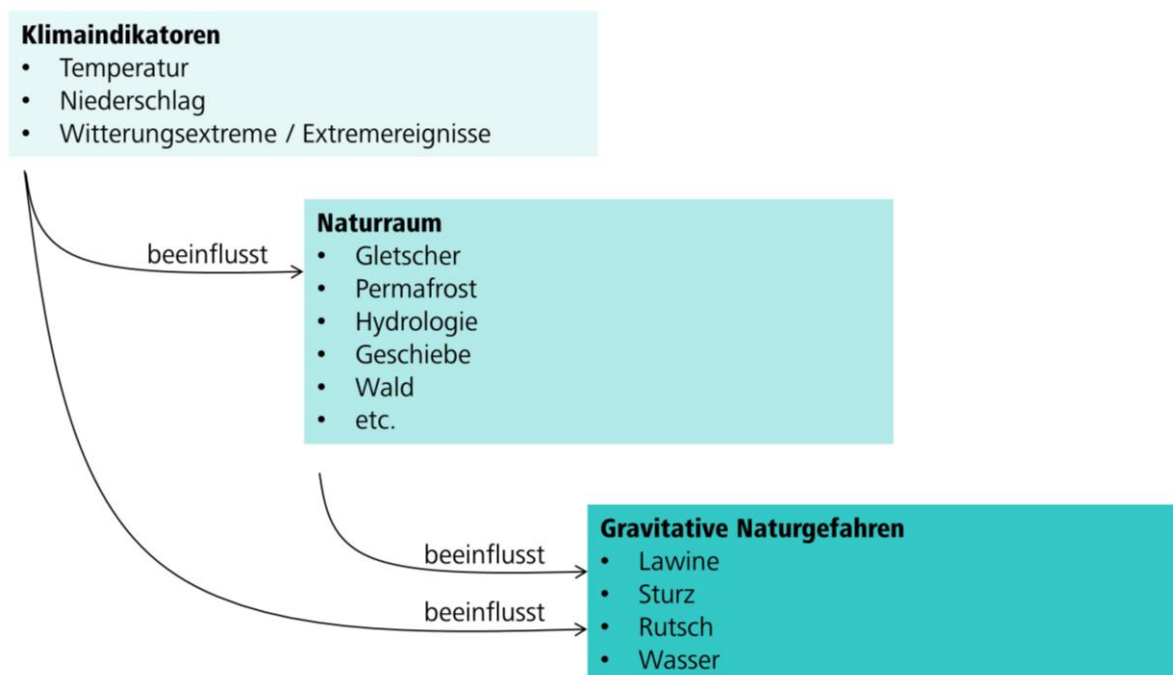


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Klimaindikatoren, Naturraum und gravitativen Naturgefahren.

2.1 Vorgehen und Konzept

Um die Vielfalt der Fachliteratur zum Einfluss des Klimawandels auf die gravitativen Naturgefahrenprozesse in der Schweiz miteinander vergleichen zu können, wurden die Studien nach einem einheitlichen Konzept untersucht (Kapitel 2.1.1) und auf Basis einer einheitlichen Vorlage (Steckbrief) systematisch zusammengefasst und präsentiert (Kapitel 2.1.2). Zentral ist dabei die Einordnung der Studien in die drei Dimensionen eines im folgenden vorgestellten Analysewürfels.

2.1.1 Dimensionen Analysewürfel

Untersucht wurden ausschliesslich Studien, die sich explizit mit dem Klimawandel in der Schweiz befassen. Diese Studien unterscheiden sich in Bezug auf den Untersuchungsraum innerhalb der Schweiz, dem oder den betrachteten gravitativen Naturgefahrenprozessen und den allfällig gemachten Aussagen zu verschiedenen Massnahmen zum Schutz vor Naturgefahren. Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp sind daher drei Dimensionen eines Analysewürfels, nach welchen die untersuchten Studien analysiert, kategorisiert und schliesslich miteinander verglichen wurden (Abbildung 2).

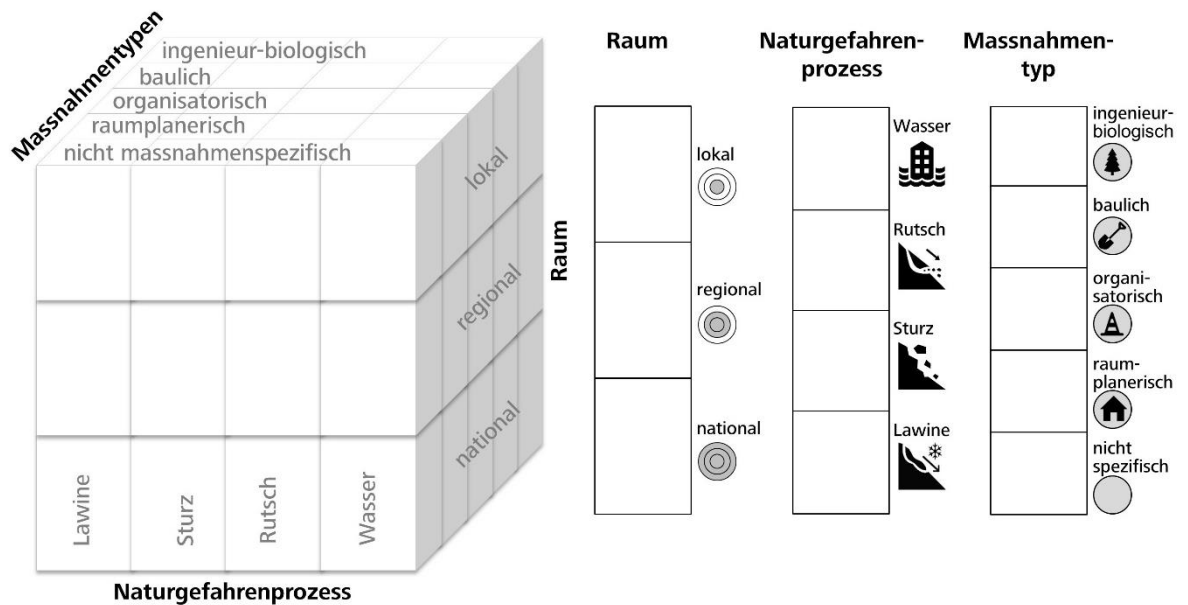


Abbildung 2: Analysewürfel und seine Dimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp.

Raum

Studien beziehen sich auf unterschiedliche Untersuchungsräume. Im vorliegenden Bericht und den untersuchten Studien liegt der Fokus auf der Schweiz. Es werden daher die drei Skalen national – regional – lokal unterschieden (Tabelle 1). Internationale Studien, die sich nicht direkt auf die Schweiz beziehen werden nicht betrachtet.

Tabelle 1: Massstabebenen der Dimension Raum.

	lokal	kleinräumige Untersuchungen
	regional	auf grossräumige Regionen der Schweiz bezogen
	national	die gesamte Schweiz betreffend

Die Einordnung in die Raumskala ist relativ. Die Abgrenzung von lokalen und regionalen Studien, oder die Einordnung einer Studie zur Raumskala regional vs. national ist nicht immer eindeutig. Im vorliegenden Bericht wurden Studien, die den Alpenraum betreffen auf der nationalen Ebene eingeordnet, nicht auf der regionalen Ebene, was ebenfalls plausibel wäre.





Zu beachten ist, dass insbesondere der Begriff "regional" dehnbar ist und sich auf verschiedene Räume beziehen kann. Unter einer Region kann z.B. ein Kanton oder "das Mittelland" verstanden werden. Weiter kann sich eine regionale Untersuchung nur auf eine einzelne Region (z.B. einen Kanton) beziehen. Oder aber es handelt sich um nationale Studien, welche die gesamte Schweiz abdecken und Aussagen mit regionaler Auflösung ermöglichen.

Eine differenziertere Betrachtung der jeweiligen Untersuchungsräume ist den einzelnen Steckbriefen zu entnehmen (siehe Kapitel 4).

Naturgefahrenprozess

Betrachtet werden die gravitative Naturgefahrenprozesse Wasser, Rutschung, Sturz und Lawine inkl. ihrer Unterprozesse (Tabelle 2).

Tabelle 2: Betrachtete Naturgefahren mit Zuordnung der jeweiligen Unterprozesse.

	Wasser	statische Überschwemmung dynamische Überschwemmung Murgang Oberflächenabfluss
	Rutschung	plötzlicher Rutschprozess permanente Rutschungen
	Sturz	Stein- und Blockschlag Fels- und Bergsturz
	Lawine	Fliesslawine Staublawine Schneegleiten

Die Unterteilung in die Haupt- und Unterprozesse der gravitativen Naturgefahren erfolgte gemäss dem aktuellen Datenmodell Gefahrenkartierung des BAFU [63].






Um die Präsentation der einzelnen Studien und ihre Vergleichbarkeit zu vereinfachen, fokussiert Kapitel 4 auf die Hauptprozesse. Eine detaillierte Analyse der Unterprozesse müsste in einem weiteren Schritt vorgenommen werden (siehe Kapitel 7.1).

Nicht berücksichtigt werden einige Unterprozesse wie z.B. Ufererosion und Eisschlag oder z.B. der Prozess Eislawine (unvermittelter und rascher Abgang von grossen Eismassen), Gletscherabbrüche oder Gletscherseen oder Einsturz/Absenkungen. Auch Prozessverkettungen werden im vorliegenden Bericht nicht speziell untersucht, obwohl sie im Hinblick auf den Klimawandel noch wichtiger werden. Grund für das Auslassen der Prozessketten ist, dass die Komplexität dieser Ereignisse so hoch ist, dass sie nicht pauschal abgehandelt werden können, sondern es immer einer gebiets- und prozessspezifischen Analyse bedarf (siehe Kapitel 6).

Massnahmentyp

Der Fokus der vorliegenden Untersuchung liegt auf Massnahmen, die ganz spezifisch den Umgang mit gravitativen Naturgefahren beschreiben (Tabelle 3).

Tabelle 3: Unterscheidung verschiedener Massnahmentypen. Unterteilung und Beschreibung gemäss BAFU [64], Reihenfolge analog Abbildung 2.

	ingenieurbiologische Massnahmen	Schutzwald und Grünverbau
	bauliche Massnahmen	Objektschutz, Schutzbauten wie Lawinerverbauungen, Hochwasserschutzdämme, Steinschlagschutznetze etc.
	organisatorische Massnahmen	Monitoring, zeitgerechte Warnung, Alarmierung und Information im Ereignisfall, Notfallplanungen, Sperrungen, Evakuierung usw.
	raumplanerische Massnahmen	angepasste Nutzung des Raums (z.B. Gefahrenkarten)
	nicht massnahmen-spezifische Angaben	Dieser Massnahmentyp wird angegeben, wenn in einer Studie keine konkreten Angaben zu Massnahmen gemacht werden.

Eine detailliertere Beschreibung der Massnahmentypen sind bei den Fachinformationen zum Umgang mit Naturgefahren des BAFU zu finden [64].

Auf allgemeine Massnahmen aus den Bereichen Kommunikation (z.B. "Sensibilisierung der Bevölkerung") und Politik (z.B. "Klärung administrativer Abläufe") wird in dieser Zusammenstellung nicht eingegangen. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel wird diesen umrahmenden Massnahmen aber unumstritten eine zentrale Bedeutung zukommen (siehe Kapitel 6.3.6).

2.1.2 Steckbriefe

Um einen Überblick über jede einzelne der untersuchten Studien zu erhalten und diese miteinander vergleichbar zu machen, wurde pro Studie ein Steckbrief erstellt, der die wichtigsten Angaben und Merkmale enthält.

Referenz

Die exakte Quellenangabe der Studie ist aufgeführt.

Zusammenfassung

Ein sehr kurzer Überblick über die in der Studie besprochenen Themen wird gegeben. Die inhaltlichen Ergebnisse werden nicht aufgeführt.

Szenarien

Es wird angegeben, auf welcher Szenarienbasis die jeweilige Studie erstellt wurde. Das jeweils betrachtete Klimaszenario beeinflusst die Resultate einer Studie stark (siehe Kapitel 6.1). Dieser Hinweis ist daher relevant für die Erwartungen an den Detaillierungsgrad und die Aussagekraft der Resultate sowie für den Vergleich und die Bewertung von Resultaten verschiedener Studien.

Einordnung in die Dimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp

Die graphische und textliche Einordnung der Studie in die drei Dimensionen des Analysewürfels geben einen Überblick darüber, welche Themen in der Studie in welcher Tiefe besprochen werden (Abbildung 3).

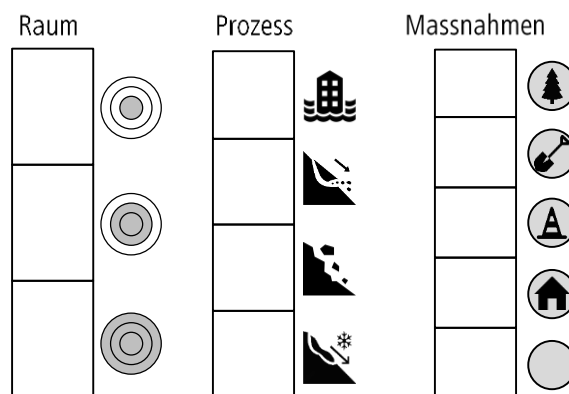






Abbildung 3: Graphische Darstellung der drei untersuchten Dimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp.




Je nach Informationsgehalt der betrachteten Studie werden die einzelnen Elemente der Analysedimensionen graphisch unterschiedlich dargestellt. Beim Naturgefahrenprozess gibt der Füllgrad der einzelnen Elemente Hinweise auf den Informationsgehalt (Tabelle 4).

Tabelle 4: Graphische Darstellung des Informationsgehalts bzgl. Naturgefahrenprozess. Der Füllgrad der einzelnen Graphikelemente gibt Hinweise auf die Substanz bzw. den Gehalt der in der Studie enthaltenen Informationen in Bezug auf den jeweiligen Naturgefahrenprozess.

Informationsgehalt bezüglich Naturgefahrenprozess			
			
zentrales Thema Prozess wird ausführlich behandelt	u.a. behandelt Prozess wird angesprochen, liegt aber nicht im Fokus der Untersuchung	am Rande behandelt Aussagen zum Prozess sind möglich	nicht behandelt Keine Aussagen zum Prozess möglich

Bei den Dimensionen Raum und Massnahmentyp zeigt der Sättigungsgrad der Füllfarbe an, ob in der jeweiligen Studie direkte Aussagen zum jeweiligen Element gemacht werden, oder ob anhand der enthaltenen Informationen zumindest Interpretationen zu den einzelnen Elementen möglich sind (Tabelle 5). Konsequenterweise ist der Massnahmentyp „nicht massnahmenspezifisch“ immer transparent dargestellt, da er dann ausgewählt wurde, wenn Massnahmentypen nicht direkt angesprochen wurden (siehe Tabelle 3).

Tabelle 5: Graphische Darstellung des Informationsgehalts bzgl. Raum und Massnahmentyp. Der Sättigungsgrad der eingefärbten Graphikelemente gibt Auskunft über den Interpretationsgrad der Aussagen in Bezug auf den Raum bzw. Massnahmentyp.

Informationsgehalt bezüglich Raum bzw. Massnahmentyp		
		
direkt angesprochen Thema wird explizit behandelt	Interpretation Aussagen zum Thema sind indirekt möglich	Keine Aussage möglich

Zu beachten ist, dass der Füllgrad und die Transparenz der einzelnen Elemente nur Hinweise darauf geben, ob das entsprechende Thema (z.B. Sturzprozesse) in der jeweiligen Studie behandelt wird oder nicht. Auf den inhaltlichen Informationsgehalt wird nicht eingegangen (siehe Kapitel 5).

Fazit




Es wird angegeben, ob die jeweilige Studie konkrete Angaben enthält und als Planungsgrundlage dienen kann, oder ob allgemeingültige Aussagen gemacht werden, die bei der Erstellung eines Konzepts/einer Strategie berücksichtigt werden sollten. Das Fazit gibt demnach Hinweise zur Gültigkeit und Weiterverwendbarkeit der Studie für verschiedene Zwecke (Tabelle 6).

Tabelle 6: Fazit – Beurteilung der Gültigkeit der jeweiligen Studie für Strategie- oder Planungszwecke.

Konzept/Strategie	Allgemeingültige Aussagen werden gegeben, die als Grundlage für die Entwicklung einer nationalen Strategie bzgl. dem künftigen Umgang mit Naturgefahren dienen können.
Planung	Konkrete Einzelfälle (gebiets- prozess- und/oder massnahmenspezifisch) werden untersucht und Angaben zur spezifischen Massnahmenplanung sind daraus ableitbar.

Graphisch wird die Beurteilung des Nutzens der jeweiligen Studie für den entsprechenden Zweck (Strategieentwicklung oder Massnahmenplanung) gemäss Tabelle 7 dargestellt.




Tabelle 7: Graphische Darstellung der Beurteilung des Nutzens der jeweiligen Studie für Strategie- bzw. Planungszwecke.

	Die Studie kann als Grundlage dienen für Strategien bzw. Planungen
	Zusatzinformationen für Strategien bzw. Planungen sind enthalten
	Die Studie enthält für den vorliegenden Zweck wenig relevante Informationen

Beurteilung der Relevanz

Es wird die Relevanz der jeweiligen Studie in Bezug auf ihren Nutzen für die Ausarbeitung nationaler Strategien zum Umgang mit Naturgefahren im Hinblick auf den Klimawandel oder für die konkrete Planung von Schutzmassnahmen eingeschätzt (Tabelle 8).

Tabelle 8: Einordnung der Studien in Bezug auf ihre Relevanz.

	Relevanz 1	zentrale Studien
	Relevanz 2	hilfreiche Informationen und/oder Methoden
	Relevanz 3	Zusatzinformationen

Besonderheiten

Exemplarisch werden Besonderheiten aufgeführt. Es kann sich dabei um explizit hervorgehobene Methoden oder Ergebnisse handeln, oder es werden z.B. in der Studie speziell erwähnte Forschungs- und Wissenslücken präsentiert. Zu beachten ist bei den jeweils aufgeführten Lücken, dass diese durch Einbezug weiterer Studien wieder geschlossen werden können. Erst die Betrachtung der gesamten Literatur zeigt die schliesslich verbleibenden Lücken auf.

2.2 Untersuchte Literatur

Die vorliegende Zusammenstellung liefert einen strukturierten Überblick über 42 fachliche Studien. Der Fokus liegt auf Studien die schwerpunktmässig in den letzten 10 Jahren zum Thema Naturgefahren und Klimawandel in der Schweiz verfasst wurden (Abbildung 4, "untersuchte Studien" in der Referenzliste).

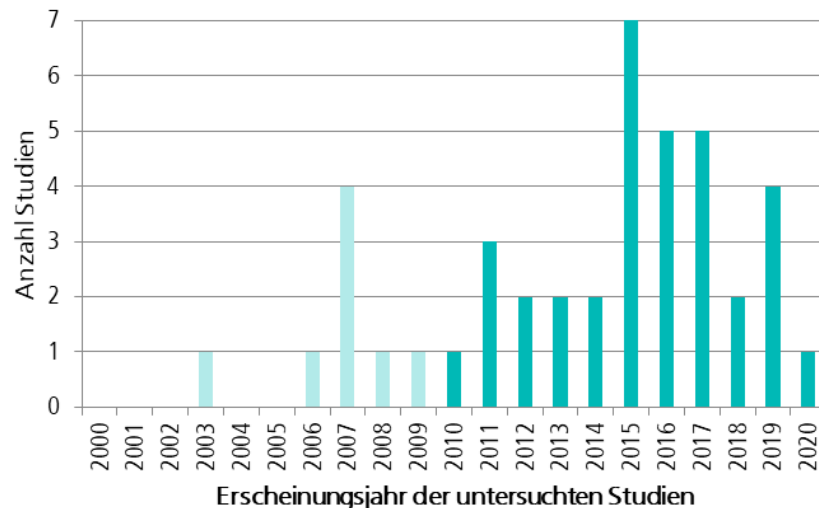


Abbildung 4: Anzahl untersuchte Studien nach Erscheinungsjahr.
Der Fokus liegt auf Studien aus den letzten 10 Jahren (dunkeltürkis dargestellt).

Die Auswahl der betrachteten Studien erfolgte durch Fachexperten und ist als Momentaufnahme zu verstehen. Fokussiert wurde auf Syntheserichte, welche verschiedene Referenzen beinhalten, die nicht zusätzlich untersucht wurden. Der vorliegende Bericht und die dem Bericht zugrundeliegende Literaturliste hat keinesfalls Anspruch auf Vollständigkeit. Es ist bereits heute bekannt, dass weitere Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren in Erarbeitung sind (siehe Kapitel 7.1 und "weitere mögliche Studien von Relevanz" in der Referenzliste), die jedoch noch nicht zur Verfügung stehen.

Vorzugsweise werden die Studien in einem Steckbrief präsentiert. Nicht für alle der 42 im Bericht zusammengefassten Studien war dies jedoch sinnvoll:

- Sieben Studien beziehen sich nicht auf Naturgefahrenprozesse, sondern es werden Änderungen der Klimaindikatoren selbst (z.B. Niederschlag) oder des Naturraums (z.B. Schneedecke oder Abflüsse) untersucht. Zusammenfassungen der einzelnen Studien mit den jeweils wichtigsten Erkenntnissen sind in Kapitel 3 bzw. im Anhang enthalten.
- Bei vier Studien handelt es sich um ergänzende Berichte (z.B. Methodenberichte), die nicht einzeln erfasst, sondern in die Steckbriefe der jeweils zugehörigen Studien integriert sind.

Für die 31 verbleibenden Studien wurden Steckbriefe erstellt, die nach Relevanz geordnet und anschliessend alphabetisch sortiert in Kapitel 4 aufgeführt sind. Die Relevanz der 31 Studien wurde folgendermassen eingestuft:

- 12 zentrale Studien (Relevanz 1)
davon sechs allgemein und sechs massnahmenspezifisch
- 12 Studien mit hilfreichen inhaltlichen Informationen oder Methoden (Relevanz 2)
- 7 Studien mit Zusatzinformationen, deren Mehrwert für die hier verfolgten Ziele begrenzt ist (Relevanz 3)

3 Grundlagen Klimaszenarien

Die in der vorliegenden Zusammenstellung betrachteten Studien basieren auf unterschiedlichen Klimaszenarien. Im Folgenden werden die verschiedenen verwendeten Grundlagen zusammenfassend vorgestellt und Unterschiede hervorgehoben. Detaillierte Angaben und Hintergrundfakten können den jeweiligen Studien entnommen werden. Für die zentralen Klimastudien wird jeweils angegeben auf welchen Raum sie sich beziehen, welche Prognosewerte im Zentrum stehen und welche Aussagen in Bezug auf Extreme möglich sind.

3.1 Globale Klimaszenarien

Globale Klimamodelle (Global Climate Model GCM) bilden das weltweite Klimasystem ab. Sie untersuchen u.a. auf Basis unterschiedlicher Annahmen zur künftigen Treibhausgasentwicklung in der Atmosphäre (Emissionsszenarien, Tabelle 9) die globale Klimaänderung in den nächsten ca. 100 Jahren. Die Computermodelle liefern Aussagen dazu wie sich verschiedene Klimaindikatoren wie Temperatur, Niederschlag und zum Beispiel die Lage der Schneefallgrenze weltweit verändern könnten. Die räumliche Auflösung der GCMs liegt bei 100 – 250 km. [65]

Tabelle 9: Emissionsszenarien – Representative Concentration Pathways, RCP
Die Emissionsszenarien bilden die Grundlage sowohl für die globale Prognosen als auch für die Schweizer Klimaszenarien. [66]

Szenario	RCP-Szenario	Eigenschaften
Kein Klimaschutz	RCP8.5	Es werden keine Klimaschutzmassnahmen ergriffen. Die Treibhausgasemissionen nehmen stetig zu.
Begrenzter Klimaschutz	RCP4.5	Der Ausstoss von Treibhausgasemissionen wird zwar eingedämmt, aber der Gehalt in der Atmosphäre steigt noch weitere 50 Jahre.
Konsequenter Klimaschutz	RCP2.6	Klimaschutzmassnahmen werden ergriffen. Mit einer umgehend eingeleiteten Senkung der Emissionen wird der Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre bis in etwa 20 Jahren gestoppt.

3.1.1 IPCC – Sachstandsberichte

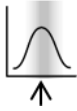
Der Stand der Forschung, die projizierte globale Klimaänderung und ihre Auswirkungen werden vom Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC in regelmässigen Abständen in den IPCC-Sachstandsberichten (Assessment Reports) zusammengefasst und publiziert. Bisher wurden vom IPCC fünf Sachstandsberichte (1990, 1995, 2001, 2007, 2013/2014) und mehrere Zusatzberichte veröffentlicht. Diese Dokumente sind die umfassendsten und objektivsten verfügbaren wissenschaftlichen Grundlagen zum globalen Klimawandel und international anerkannt. [6] Die IPCC-Berichte gelten als Standard-Nachschlagewerk und sind wichtige Informationsgrundlage für die politischen Entscheidungsträger in der ganzen Welt. [17]

Der aktuellste, 5. Sachstandsbericht des IPCC aus dem Jahr 2013/2014 umfasst drei Bänder, in welchen die wissenschaftlichen Grundlagen (Band I) präsentiert, die Folgen, Anpassungen und Verwundbarkeit von Natur und Gesellschaft (Band II) besprochen und Möglichkeiten zur Minderung des Klimawandels (Band III) aufgezeigt werden. [6] Grundlage für die Analyse bildet das CMIP5-Projekt (Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5). [12] Die Resultate dieser Studie bestätigen die Aussagen zu den mittleren Veränderungen aus der CMIP Phase 4 weitgehend, liefern jedoch klarere Aussagen zu Extremen.

IPCC Berichte

**Raum: Welt**

Standard-Nachschlagewerk für globale Klimaszenarien. Aufgrund der geringen räumlichen Auflösung der GCM's von 100 – 250 km sind lokale Aussagen nur sehr beschränkt möglich. Für ein kleines Land wie die Schweiz können deshalb aus den IPCC-Berichten nur generelle Trendaussagen abgeleitet werden.

**Prognose: Mittelwerte**

Der Fokus der bisherigen IPCC-Berichte liegt auf der Prognose von Mittelwerten. Im neuesten Bericht werden klarere qualitative Aussagen zu Veränderungen bei den Extremen gemacht.

3.1.2 SROCC – Special Report on Ocean and Cryosphere in a Changing Climate

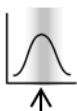
Dieser Ergänzungsbericht zum 5. Sachstandsbericht des IPCC behandelt sowohl Klimaszenarien als auch den Impact des Klimawandels auf Ozeane und die Kryosphäre. Wie bei den Sachstandsberichten handelt es sich hier um eine Zusammenfassung der verfügbaren wissenschaftlichen Grundlagen. [7]

Beim Thema Kryosphäre widmen sich spezielle Kapitel den Hochgebirgen. Viele Aussagen beziehen sich auch auf die Alpen. Beschrieben werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Schneedecke, die Gletscher, den Permafrost und auf die Abflüsse und damit auf Aspekte, die für Naturgefahrenprozesse in der Schweiz relevant sind.

SROCC

**Raum: Welt**

Nachschlagewerk zu den beobachteten und erwarteten Veränderungen des Klimas bezogen auf die Ozeane und die Kryosphäre und deren Auswirkungen. Neben generellen Aussagen zu den verschiedenen Gebirgsräumen werden im Bericht auch lokale Beispiele beschrieben.

**Prognose: Mittelwerte**

Beschrieben werden hauptsächlich generelle Trends. Aussagen zu Extremen gehen kaum über die des 5. Sachstandsberichts des IPCC hinaus.

3.2 Regionale Klimamodelle

Die GCMs verfügen nicht über die nötige räumliche Auflösung um kleinräumige Phänomene zu beschreiben. Gerade diese können aber erhebliche Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft haben. [45] Um die Auswirkungen der grossskaligen Veränderungen auf spezifische Regionen zu untersuchen, werden Regionale Klimamodelle (Regional Climate Model RCM) mit Detailinformationen aus der entsprechenden Region und ihrer Umgebung in die GCMs eingebettet (Abbildung 5). Im Gegensatz zu einem allgemeinen Zirkulationsmodell (GCM) liefern RCMs Informationen auf viel kleineren Skalen innerhalb kontinentaler Bereiche. Anfangs- und Randbedingungen der RCMs werden durch die treibenden GCMs vorgegeben. [51] Der projizierte Klimawandel für Europa zeigt für die meisten Gebiete eine gute Übereinstimmung mit den globalen Prognosen.

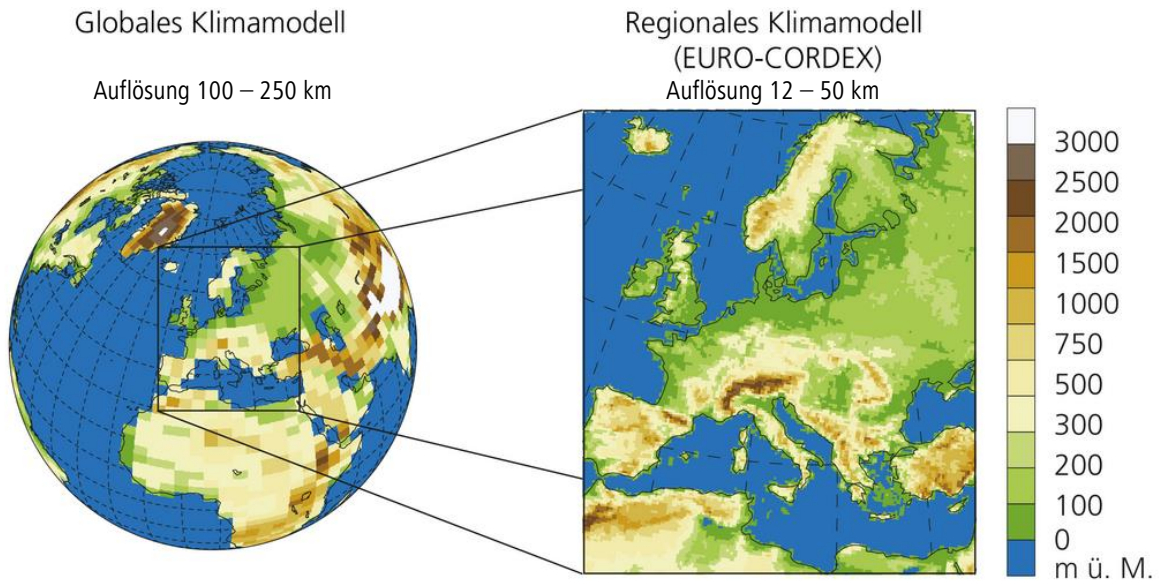


Abbildung 5: Vergleich GCM und RCM am Beispiel von EURO-CORDEX. EURO-CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – European Domain). verfeinert mit Hilfe von regionale Klimamodellen globale Klimasimulationen für Europa. [3]

Um die die Modellunsicherheit in den globalen und regionalen Modellen zu erfassen, werden "Ensembles" mit mehreren "Members" gebildet. Dazu werden Modellketten aus unterschiedlichen globalen und regionalen Modellen durchgerechnet. Dieses Vorgehen erlaubt die Abschätzung der mit den Prognosen verbundenen Unsicherheiten. [66]

3.2.1 Klimaszenarien für Europa

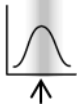
Die Projekte PRUDENCE, ENSEMBLES und EURO-CORDEX sind Beispiele für drei Generationen von auf Basis von RCM-Simulationen erarbeiteten Klimaszenarien für Europa (Tabelle 10).

Tabelle 10: Beschreibung der Projekte PRUDENCE, ENSEMBLES und EURO-CORDEX, welche Klimaszenarien für Europa liefern.

Projekt	Beschreibung
PRUDENCE	Im Projekt Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects wurden von 2001 bis 2004 Informationen über die zukünftige Klimaentwicklung in Europa aufbereitet. [10] CH2007 basiert auf den PRUDENCE Simulationen.
ENSEMBLES	EU-Projekt, das von 2004 bis 2009 auf Basis der IPCC-Arbeiten Klimasimulationen für Europa und die Alpen erarbeitet wurde. Die Projektionen bestehen aus 22 hochaufgelösten RCM-Simulationen (max. räumliche Auflösung 25 km) für das 21. Jh. (2070 – 2099). 17 verschiedenen RCM und 8 GCM wurden angewandt. [44] [33] und [26] Um zu verlässlichen Resultaten zu gelangen wurden möglichst viele globale und regionale Klimamodelle für das jeweils gleiche Gebiet, dieselben Zeiträume und in der gleichen Auflösung angewandt. [5] Die ENSEMBLES Szenarien waren Grundlage für CH2011.
EURO-CORDEX	Das Coordinated Regional Downscaled Experiment für Europa ist eine Initiative des Weltklimaforschungsprogramm und verfeinert auf Basis des 5. Sachstandsberichts des IPCC globale Klimasimulationen für Europa und die Alpen. Die Initiative stellt die momentan aktuellsten qualitätskontrollierten Datensätze mit herunterskalierten Informationen für die Vergangenheit (1970 – 2005) und für die zukünftige Klimaänderung (2006 – 2100) zur Verfügung. [51], [26] Die EURO-CORDEX Szenarien bilden die Grundlage für CH2018.

PRUDENCE, ENSEMBLES und EURO-CORDEX Simulationen**Raum: Europa**

Die Auflösung der regionalen Klimamodelle liegt heute bei 12 bis 50 km.

**Prognose: Mittelwerte**

Die Quantifizierung von Veränderungen in den Extremen ist mit den beschriebenen Klimasimulationen und mit RCMs insbesondere für den Niederschlag schwierig. [33]

3.3 Klimaszenarien für die Schweiz

Die Klimaentwicklung in der Schweiz ist zum einen von globalen und regionalen Trends und zum anderen durch lokale Faktoren beeinflusst. Aufgrund ihrer komplexen Topographie ist es für die Schweiz wichtig, dass möglichst hochaufgelöste Modelle und kleinräumige Klimaszenarien verwendet werden. RCMs sind mit einer Auflösung von ca. 25 km zu grob für kleinskalige Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels und können zudem beträchtliche Fehler gegenüber Messreihen aufweisen. [65] Mit Hilfe von statistischen Verfahren (statistischem Downscaling) lässt sich die räumliche Auflösung der Ergebnisse von RCMs weiter verfeinern. In Kombination mit langjährigen, zuverlässigen Messreihen in der Referenzperiode werden Modelle kalibriert und es sind Aussagen zur Veränderung von Klimaindikatoren wie Temperatur und Niederschlag mit einer Auflösung von 2 km möglich. [66]

2007 (CH2007), 2011 (CH2011) und 2018 (CH2018) wurden basierend auf den jeweils aktuellen IPCC-Berichten und den aktuellen Simulationen für Europa Klimaszenarien für die Schweiz veröffentlicht. Die Szenarien sind in ihren Hauptaussagen ähnlich, unterscheiden sich aber in Bezug auf ihren Detaillierungsgrad und insbesondere auch bezüglich der Methoden, mit denen sie hergeleitet wurden (Tabelle 11). Das Szenario CH2007 wurde direkt aus den Regionalen Modellen abgeleitet, ohne Downscaling. Für CH2011 wurde ein Downscaling mit Hilfe der Delta Change Methode vorgenommen. Für CH2018 kam die Quantile Mapping Methode zum Einsatz. Letztere bietet eine bessere Abbildung der Szenarien im Randbereich der Verteilungen. Die Methoden werden in den Berichten zu den Klimaszenarien beschrieben.

Tabelle 11: Vergleich der drei Generationen von Klimaszenarien für die Schweiz CH2018, CH2011 und CH2007 [4]

	CH2018	CH2011	CH2007
Model Ensembles	EURO-CORDEX	ENSEMBLES	PRUDENCE
Auflösung	12 km und 50 km	25 km	50 km
Anzahl Simulationen	26	14	16
Anzahl verwendeter GCMs	13	6	2
Anzahl verwendeter RCMs	9	10	8
Emissionsszenarien	RCP8.5 RCP4.5 RCP2.6	RCP3PD A1B A2 ¹	A2 und B2
Simulationsperiode	1971 – 2100	1951 – 2100	1961 – 1990; 2071 – 2100

¹ Das RCP3PD-Szenario entspricht dem RCP2.6 und das A2-Szenario in etwa dem RCP8.5. Für A1B gibt es kein entsprechendes Szenario, für den Zeitraum 2035 bis 2060

	CH2018	CH2011	CH2007
Szenarienperiode	2020 – 2049 ("2035") 2045 – 2074 ("2060") 2070 – 2099 ("2085")	2020 – 2049 ("2035") 2045 – 2074 ("2060") 2070 – 2099 ("2085")	2030 2050 2070
Referenzperiode	1981 – 2010	1980 – 2009	1990
Modellierungsregionen	5 Regionen: Nordostschweiz Westschweiz Südschweiz westliche Alpen östliche Alpen	3 Regionen: Nordostschweiz Westschweiz Südschweiz	2 Regionen: Nord- und Südschweiz
Downscaling Methode	Quantile Mapping	Delta Change	Kein Downscaling, nur Auswertung der Rasterpunkte der RCMs
Information zu Klimaextremen	quantitativ (Modellierung)	qualitativ (Literaturrecherche)	qualitativ (Literaturrecherche)
Lokale Projektionen	Transiente Zeitreihen 1971 – 2099, tägliche Auflösung	30-jährige mittlere Änderung im Jahreszyklus (tägliche Auflösung)	–
Verfügbare lokale Daten	tägliche Temperaturangaben (Min./Max./Mittelwerte), Niederschlag, Feuchtigkeit, Strahlung, Wind	Tägliche Temperaturangaben (Mittelwerte), Niederschlag	–

3.3.1 CH2007 bzw. Klimaänderung und die Schweiz 2050

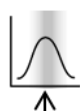
Im Bericht werden die Szenarien für Temperatur und Niederschlag für das Jahr 2050 beschrieben. Dabei wird zwischen Nord- und Südschweiz unterschieden. Die Resultate zeigen einen Temperaturanstieg um 1.8 bis 2.8 °C, abhängig von der Jahreszeit. Die regionalen Unterschiede sind gering. Für den Niederschlag resultiert bei den Sommerniederschlägen eine Abnahme, bei den Winterniederschlägen eine Zunahme. Zu den Niederschlagsextremen werden nur generelle Aussagen gemacht. [46]

CH2007



Raum: Schweiz

CH2007 liefert saisonale Daten für die beiden Regionen Nord- und Südschweiz.



Prognose: Mittelwerte

Szenarien zur Entwicklung von Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen sind noch sehr unsicher. [46]

3.3.2 CH2011

Die Szenarien CH2011 machen Aussagen zu drei Zeitperioden (2020 – 2049, 2045 – 2074 und 2070 – 2099). Für diese Zeitperioden lassen sich durch eine Überlagerung der Referenzreihe (1980 – 2009) mit den aus den Klimamodellen abgeleiteten Deltas (Differenz zwischen Referenzperiode und dem jeweiligen Szenario) Zeitreihen herleiten. Bei diesem Verfahren entspricht die Varianz der Szenarien-Zeitreihe der Referenzreihe. Das bedeutet beispielsweise, dass in den

Szenarien das Auftreten und die Dauer von Trocken- oder Niederschlagsperioden denen der Referenzreihe entspricht. Die Werte werden nur skaliert. Aussagen zu Veränderungen bei den Extremen sind bedingt durch die Downscaling-Methode nur in qualitativer Form möglich. [3]

Neben den Resultaten zu den drei Regionen Nordostschweiz, Westschweiz und Südschweiz stehen die Deltas für eine grosse Zahl von Niederschlags- und Temperaturmessstationen zur Verfügung. Dies erlaubt eine räumlich differenzierte Berücksichtigung der Veränderungen.

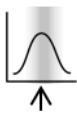
Der Trend bei der Temperatur entspricht weitgehend dem im Szenario CH2007. Beim Niederschlag sind die Aussagen weniger klar, als beim Szenario CH2007. [3]

CH2011



Raum: Schweiz

CH2011 liefert Daten für jede Temperatur- und Niederschlagsstation in der Schweiz. [39]



Prognose: Mittelwerte

Die Klimaszenarien sind nicht geeignet für die Herleitung von quantitativen Aussagen zu Veränderungen bei Extremereignissen. [18]

3.3.3 CH2018

Die aktuellsten verfügbaren Klimaszenarien für die Schweiz CH2018 bestätigen die bisher bekannten Trends aus CH2007 und CH2007. CH2018 ermöglicht aber u.a. aufgrund der im Vergleich zu CH2011 vierfachen räumlichen Auflösung und aufgrund der Methode, durch die sie hergeleitet wurden, detailliertere und vermehrt quantitative Aussagen zum zukünftigen Klima.

Inhaltlich zeigen die Prognosen CH2018 vier Hauptveränderungen für die Schweiz (Abbildung 6).



Abbildung 6: Klimazukunft der Schweiz vereinfacht dargestellt anhand vier fiktiver Personen, die von den vier Hauptveränderungen betroffen sind. [66]

Methodisch wurde bei der Herleitung von CH2018 im Gegensatz zu den Klimaszenarien CH2011 das Verfahren des Quantile Mapping angewandt. Gegenüber der Delta Change Methode hat das Verfahren des Quantile Mapping den Vorteil, dass auch Veränderungen bei den Extremen aus den Klimamodellen abgebildet werden können. [32] Weiter werden mit dem neuen Verfahren auch Veränderungen in der Variabilität abgebildet.

Daraus ergeben sich neue Möglichkeiten für die Erforschung von meteorologischen und hydrologischen Extremereignissen. Unter anderem eröffnet sich z.B. die Möglichkeit

Extremwertstatistiken oder auch verschiedene Ereignisabläufe und Ereignistypen (z.B. Regen auf Schnee oder die Einbettung von Starkniederschlägen in die Vorgeschichte) zu analysieren. In Bezug auf Extremwertstatistiken bestehen jedoch nach wie vor deutliche Unsicherheiten. [65] Weiter liegen neu räumlich differenziertere Grundlagen zur Verfügung, da die Szenarien zusätzlich zu den Stationsstandorten auch als Rasterdaten vorliegen. Mit diesen Rasterdaten kann z.B. die Höhenabhängigkeit der Klimaparameter dargestellt werden was u.a. für die Permafrostmodellierung entscheidend ist. Weiter lassen sich aus den Rasterdaten Gebietsniederschläge berechnen. Mit Hilfe der neuen Szenarien CH2018 können daher die Auswirkungen des Klimawandels im integralen Risikomanagement vor Naturgefahren konkret und in vielen Bereichen auch quantitativ berücksichtigt werden.

CH2018



Raum: Schweiz

Informationen zur zukünftigen Klimaentwicklung in Bezug auf Temperatur und Niederschlag liegen zusätzlich zu den Stationsdaten ebenfalls als Rasterdaten vor.



Prognose: Mittelwerte und Extreme

Neben den mittleren Veränderungen werden ebenfalls Trends von Extremen betrachtet. Dies ist von Bedeutung, da sie sich nicht proportional zueinander verändern. Je nach Jahreszeit und Ort sind die prognostizierten Veränderungen sogar gegenläufig. [33] Weiterhin nicht berücksichtigt sind Starkniederschläge kurzer Dauer.

Die Klimaszenarien CH2018 zeigen, dass das wissenschaftliche Verständnis der zukünftigen Entwicklung des Klimas trotz weiterhin bestehender Unsicherheiten gross ist.

3.4 Weitere wissenschaftliche Erkenntnisse von Bedeutung

Wie bereits erwähnt, ergeben sich mit den Klimaszenarien CH2018 neue Möglichkeiten in Bezug auf höhere räumliche Auflösung, Modellierung von Höhenabhängigkeit und Aussagen zu Extremen. Mit CH2018 weiterhin nicht abgedeckt sind Starkniederschläge kurzer Dauer. Hier gilt wie in Ban et al. 2015 und Scherrer et al. 2016 beschrieben die Clausius-Clapeyron-Beziehung. Diese besagt, dass bei 1°C Temperaturanstieg der Wassergehalt der Atmosphäre und damit die Intensivniederschläge um ca. 7 % zunehmen.

Ban et al. (2015): Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster? [21]

Starkniederschläge haben einen bedeutenden Einfluss auf die Auslösung von Naturgefahrenprozessen wie Überschwemmungen ("flash floods"), Erosion, Rutschungen und Murgänge. Ihre Skalierung in den bisherigen Klimamodellen ist aber inkonsistent. Eine Herausforderung besteht darin, dass durch Extrapolation der heutigen Niederschläge nicht auf künftige Niederschläge geschlossen werden kann. In der vorliegenden Studie werden erstmals die sommerlichen (Stunden- und Tages-) Starkniederschläge mit Hilfe eines Konvektions-Modells untersucht. Die Resultate zeigen, dass sich die Starkniederschläge mit der Feuchteverfügbarkeit asymptotisch mit der Clausius-Clapeyron Beziehung intensivieren, also um 6-7 % pro Grad Erwärmung in Kelvin.

Trends und Prognosen für Extreme sind von Natur aus unsicherer als Abschätzungen für Mittelwerte. Trotzdem gibt es bereits Wege damit umzugehen, wie z.B. Scherrer et al. 2016 zeigen. Signifikante Trends werden aufgezeigt, die in Zukunft extrapoliert werden.

Scherrer et al. (2016): Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland [52]

Auf Basis von Temperatur- und Niederschlagsmessungen aus den Jahren 1901 – 2014/15 werden trotz erheblicher lokaler interner Variabilität positive Trends von Starkniederschlägen und Hitzeextremen aufgezeigt. Starkniederschlagsereignisse haben in den letzten 100 Jahren zugenommen sowohl bezüglich der jährlichen maximalen Tagesniederschläge (Intensität, +10 % / 100j.) als auch in Anbetracht der Anzahl Tage, an welchen das 99 %-Perzentil der Tagesniederschläge aus der Beobachtungsperiode überschritten wurde (mittlere Änderung +26.5 % / 100j.). Die Intensität der Starkniederschläge steigt im Mittel analog der Clausius-Clapeyron-Beziehung um 7.7 % pro °K Erwärmung der Schweizer Jahresmitteltemperatur, die seit 1901 um 1.9°K anstieg (je nach Region um 1.6 – 2.3°K). Mehr als verdreifacht hat sich die Häufigkeit von sehr heissen Tagen, welche das 99 %-Perzentil der Tageshöchsttemperaturen aus der Beobachtungsperiode überschreiten.

3.5 Einzelne weitere Klimagrundlagen

Die meisten, aber nicht alle im vorliegenden Bericht betrachteten Studien basieren auf den oben beschriebenen und jeweils aktuellen IPCC Berichten (Kapitel 3.1), den vorgestellten Projekten zur Szenarienbildung für Europa (Kapitel 3.2) oder den nationalen Klimaszenarien für die Schweiz (Kapitel 3.3). Diese Grundlagen wurden in verschiedenen Studien weiter untersucht und z.T. verfeinert. Vollständigkeitshalber werden im Folgenden die Einzelstudien aufgeführt, welche als Szenarienbasis für eine der in Kapitel 4 aufgeführten Studien dienen.

Beniston et al. (2007): Future extreme events in European climate [1]

Auf Basis der regionalen Klimasimulationen des PRUDENCE-Projekts untersuchen Beniston et al. wie sich Extremereignisse wie Starkniederschläge, Sturmfluten aber auch Hitzewellen, Dürren und Sturmereignisse bis Ende des 21. Jahrhunderts verändern werden. Es wird deutlich, dass zum Zeitpunkt der Studie (2007) insbesondere bei Niederschlagsprognosen die Variation zwischen den verschiedenen Modellen gross ist und sowohl die interne als auch die Variabilität zwischen den verschiedenen betrachteten Emissionsszenarien übersteigt.

Nogués-Bravo et al. (2007): Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century [9]

Ausgehend von globalen Klimamodellen, dem 3. IPCC Sachstandsbericht (2001) und anhand von vier verschiedenen Emissionsszenarien untersuchten Nogués-Bravo et al. die Entwicklung der Oberflächentemperatur in verschiedenen Berggebieten der Welt. Sie kommen zum Schluss, dass die Erwärmungsrate in Berggebieten bis Ende des 21. Jahrhunderts voraussichtlich zwei- bis dreimal höher ausfallen wird als im 20. Jahrhundert.

Schädler et al. (2007): Grundlagen zum Klima [11]

Gestützt auf den regionalen Klimamodellen des Europäischen Forschungsprojekts PRUDENCE und deren spezifischeren Auswertungen für den Alpenraum präsentieren Schädler et al. Klimaszenarien für die Schweiz. Der Anfang 2007 vorhandene Wissensstand zur Entwicklung verschiedener Klimaindikatoren bis ins Jahr 2050 in der Schweiz wird zusammengetragen und insbesondere auf die erwarteten hydrologischen Auswirkungen (Abfluss und Hochwasser) eingegangen.

MeteoSchweiz (2013): Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht [8]

MeteoSchweiz veröffentlichte 2013 basierend auf CH2011 eine Übersicht wie sich das Klima in sechs Schweizer Grossregionen, nämlich Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen, Alpensüdseite und in den Agglomerationen und in vier verschiedenen Höhenlagen bis ins Jahr 2060 verändern wird. Die Zusammenstellung ist als eine Aufbereitung der Klimaszenarien CH2011 für die erwähnten Regionen zu verstehen. Es werden quantitative Angaben zur erwarteten Veränderung der

mittleren Temperatur und des mittleren Niederschlags gemacht und weitere ausgewählte Klimaindikatoren präsentiert. Aussagen zur Veränderung von Extremen sind qualitativer Art.

Für einige im vorliegenden Bericht betrachtete Studien wurden weitere, eigene Klimaszenarien erstellt, die z.T. auch in anderen Studien weiterverwendet wurden. Ein Beispiel dafür sind die für das Projekt CCHydro [19] erarbeiteten Klimaszenarien von Bosshard et al. 2011 [2].

Bosshard et al. (2011): Klimaszenarien für hydrologische Impactstudien in der Schweiz [2]

Die von Bosshard et al. erarbeiteten "Klimaszenarien für hydrologische Impactstudien in der Schweiz" basieren auf 10 Modellketten, nur einem einzigen Emissionsszenario (A1B), sind dafür aber täglich und lokal verfügbar. In jeder Modellkette wurden die Resultate eines grob aufgelösten GCM durch räumlich besser aufgelöste RCM verfeinert. Verwendet wurden Modelldaten des Projekts ENSEMBLES. Jede Modellkette simuliert mit einer Auflösung von 25 km und unter Anwendung der Delta Change Methode eine mögliche Entwicklung von Temperatur und Niederschlag für ganz Europa bis ins Jahr 2100. Dadurch wurde die Beschreibung der regionalen Variabilität der Klimaparameter insbesondere im topographisch komplexen Alpenraum gegenüber den damals verfügbaren nationalen Klimaszenarien verbessert. Die lokalen klimatischen Gegebenheiten (z. B. inneralpine Täler oder einzelne Berggipfel) können mit diesen Grundlagen trotz der relativ hohen räumlichen Auflösung der regionalen Klimamodelle nicht wiedergegeben werden. [19]

Auch für das Projekt Klimasensitivität Naturgefahren Val d'Hérens [32] und die Gefahrenanalyse des Fellbachs [31] wurden eigens räumlich differenzierte Klimaszenarien auf lokaler Stufe hergeleitet.

4 Studien zum Impact des Klimawandels auf gravitative Naturgefahren

Im Folgenden sind Steckbriefe von 31 Studien zum Einfluss des Klimawandels auf die gravitativen Naturgefahren in der Schweiz aufgeführt. Geordnet sind die im Folgenden aufgeführten Studien nach absteigender Relevanz und innerhalb der einzelnen Unterkapitel alphabetisch. Lagen zu einer Studie mehrere Berichte vor (Resultate- und Methodenbericht), fokussiert der jeweilige Steckbrief auf die Resultate.

4.1 Studien mit grosser Relevanz

Die als zentral bewerteten Studien werden weiter unterteilt in solche mit wichtigen allgemeinen Informationen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahrenprozesse (Kapitel 4.1.1) und solchen mit massnahmenspezifischeren Angaben (Kapitel 4.1.2).

4.1.1 Allgemeinen Informationen

Sechs zentrale Studien enthalten wichtige allgemeine Informationen und Erkenntnisse in Bezug auf die Thematik Klimawandel und Naturgefahren.

Akademie der Wissenschaften Schweiz (2016): Brennpunkt Klima Schweiz [17]

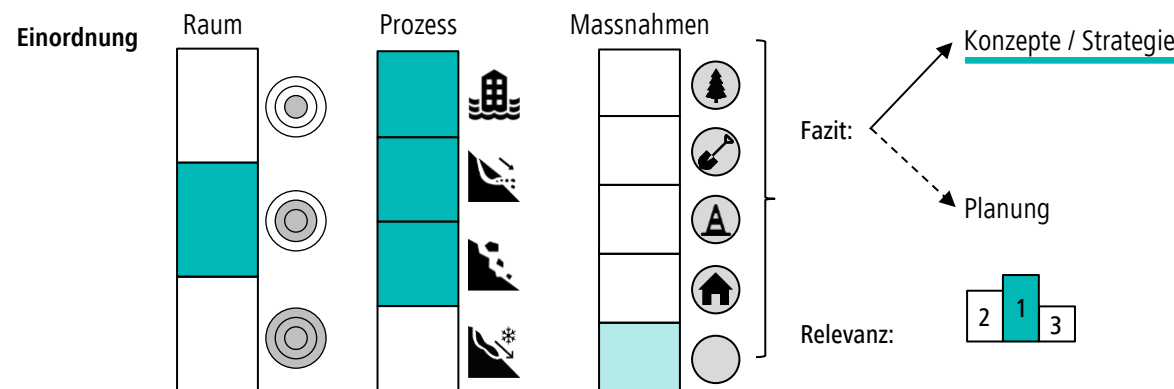
Referenz	Akademie der Wissenschaften Schweiz (2016): Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. Swiss Academic Reports 11 (5). 216 S.		
Zusammenfassung	<p>Mit Fokus auf die Schweiz werden Grundlagen und Folgen des Klimawandels auf verschiedene Bereiche dargestellt und Handlungsfelder zum Umgang mit den Herausforderungen aufgezeigt. Der Bericht basiert auf dem 5. IPCC-Sachstandsbericht, der sich vorwiegend auf die globale Ebene bezieht. Die Akademie der Wissenschaften fasst die für die Schweiz bedeutenden Forschungsergebnisse zusammen und ergänzt diese mit Erkenntnissen aus der Schweiz. Präsentiert werden die Ergebnisse in vier Teilen:</p> <p>Teil I "Physikalische Grundlagen" präsentiert die Grundzüge des Klimawandels Teil II "Folgen und Anpassungen" untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Bereiche der Natur und Gesellschaft in der Schweiz und führt die sich daraus abgeleiteten Handlungsoptionen und Anpassungsstrategien auf. Teil III "Minderung" zeigt Möglichkeiten zur Ursachenbekämpfung des Klimawandels auf. Teil IV "Klimapolitik" befasst sich mit den politischen Rahmenbedingungen.</p>		
Szenarien	CH2011 [3], IPCC 2013, 2014 [6]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p> <p>Fazit: <u>Konzepte / Strategie</u> Planung Relevanz: </p>
Raum	Fokussiert wird die nationale Ebene. Der Einbettung der Schweiz im internationalen und globalen Kontext wird grosses Gewicht beigemessen und trägt zur Verständlichkeit bei.		
Prozess	Betrachtet werden Wassergefahren und Massenbewegungen. Der Fokus liegt dabei nicht auf der Analyse der Prozesse selbst, sondern auf den sich aus diesen Prozessen und ihren erwarteten Veränderungen ergebenden Herausforderungen für die Gesellschaft.		
Massnahmen	Es werden die sich aufgrund des Klimawandels ergebenden Herausforderungen in verschiedensten Bereichen analysiert und mögliche Lösungsansätze präsentiert. Dies sind u.a. Massnahmenempfehlungen zum Schutz vor Naturgefahren.		
Fazit	Die umfassende und ganzheitliche Betrachtung des Klimawandels, seinen Herausforderungen für die Gesellschaft und die Präsentation verschiedener Minderungs- und Anpassungsmassnahmen stellen eine wesentliche Grundlage für die Ausarbeitung allgemeiner Strategien dar. Die allgemeinen Grundsätze, die für die Ausarbeitung von Schutzmassnahmen vor Naturgefahren gegeben werden, sollen auch bei der konkreten Massnahmenplanung berücksichtigt werden.		
Beurteilung der Relevanz	Die Studie präsentiert deutlich wie der Klimawandel verschiedenste Bereiche der Schweizer Naturlandschaften und der Gesellschaft verändern wird. Globale sowie die Schweiz betreffende Forschungsergebnisse sind zusammengetragen, nachvollziehbar und anschaulich präsentiert.		
Besonderheiten	Offene Fragen in Bezug auf die Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahrenprozesse sehen die Autoren u.a. in Bezug auf: <ul style="list-style-type: none"> - Hydrometeorologische Ereignisketten, also die Kombination von hydrologisch relevanten seltenen Ereignissen (z.B. Regen auf Schnee Ereignisse). - Interne Variabilität des Klimasystems, welche die Häufigkeit von extrem seltenen Naturgefahrenereignissen entscheidend beeinflussen kann. 		

ARGE GEOTEST AG, geo7 AG (2015) [15] [16] und AG NAGEF (2015) [14]: GHKperiGlazial

Referenz ARGE GEOTEST AG und geo7 AG (2015): GHKperiGlazial. Oberingenieurkreis I und BAFU Bundesamt für Umwelt Bern.
 a) Pilot Kandertal – Phase I. Methodik Bericht.
 b) Berner Oberland – Phase II. Schlussbericht Resultate.
 Und c) AG NAGEF (2015): Klimawandel und Naturgefahren – Veränderungen im Hochgebirge des Berner Oberlandes und ihre Folgen. Arbeitsgruppe Naturgefahren des Kanton Bern, Bern.

Zusammenfassung Die Studie GHK Periglazial zeigt auf, wo sich aus Gletscher- und Permafrostgebieten im Berner Oberland bis ins Jahr 2060 die Naturgefahren in Folge des Klimawandels verändern und welche Räume künftig durch gravitative Naturgefahrenprozesse betroffen sein können. Zudem werden potenziell mobilisierbare Volumina abgeschätzt.

Szenarien CH2011 [3]



Raum Untersuchungsperimeter sind die hydrologischen Einzugsgebiete im Berner Oberland, welche im Einflussbereich periglazialer Prozesse liegen.

Prozess Für jede untersuchte Prozessart wird ihre künftig mögliche räumliche Ausbreitung untersucht. Im Fokus stehen Sturzgefahren (Fels- und Bergsturz sowie Stein- und Blockschlag), Gletscher- und Eisstürze, Rutschungen (permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren), Murgang und Hochwasser aus Gletscherseen.

Massnahmen Für jeden Prozess wird untersucht, ob er künftig die heute bestehenden Siedlungsräume und Infrastrukturanlagen tangieren könnte. Dies bildet eine wichtige Grundlage für weiterführende raumplanerische, politische und finanzielle Fragen bzgl. Naturgefahrenentwicklung im Berner Oberland. Konkrete Aussagen zur Massnahmenplanung werden keine gemacht. Einzig die Bedeutung und das allgemeine Konzept bei der systematischen Erfassung und Beobachtung des Zustands der Einzugsgebiete im periglazialen Raum und der dort ablaufenden Gefahrenprozesse (Monitoring) wird behandelt.

Fazit Die Identifikation potenziell kritischer Gebiete erlaubt strategische Massnahmenüberlegungen für den periglazialen Raum und bietet u.a. eine erste Grundlage für die Ausarbeitung einer Strategie für den künftigen Gewässerunterhalt und die Geschiebemanagement im Berner Oberland. Die Studie bietet eine geeignete Grundlage, um potenzielle Gefahrengebiete im periglazialen Gebiet räumlich einzugrenzen und deren Entwicklung gezielt zu beobachten bzw. ungünstige Entwicklungen frühzeitig zu erkennen. Ausgeschiedene potenzielle Gefahrengebiete geben Hinweise darauf, ob bei der Massnahmenplanung eine detaillierte, lokale Gefahrenbeurteilung und Analyse der Auswirkungen des Klimawandels angezeigt ist.

Beurteilung Relevanz Die Studie hat grosse Relevanz. Denn gemäss den Autoren wird der Wirkungsbereiche hochalpiner Prozesse durch Veränderungen im periglazialen Raum des Berner Oberlandes und die Abklärung des Gefahrenpotentials in Zukunft eine wichtige Grundlage für die Beantwortung der weiterführenden raumplanerischen, politischen und finanziellen Fragen bezüglich der Naturgefahrenentwicklung darstellen. [16]

Besonderheiten

Es wird erwartet, dass insgesamt nicht die gravitativen Naturgefahrenprozesse die grosse Herausforderung im Umgang mit dem Klimawandel werden, sondern deren indirekte Beeinflussung der Gewässer: Durch vermehrten Geschiebeeintrag aus destabilisiertem Permafrost und Gletscherrückzugsgebieten in viele Gewässer steigt der Aufwand für den Gewässerunterhalt und die Geschiebemanagement. [14]

In einem separaten Bericht werden die in der GHKperGlazial angewandte Methodik deren Stärke und Herausforderungen aufgezeigt. [15]

In der Broschüre AG NAGEF (2015) [14] sind für Gemeinden und andere sicherheitsverantwortliche Stellen sowie interessierte Personen aus der Bevölkerung die wichtigsten Inhalte der Studie GHKperGlazial beschrieben. Die verständliche und anschauliche Aufbereitung der Inhalte bringt die Forschungsergebnisse einer breiteren Bevölkerungsgruppe näher.

BAFU (2012): CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf das Wasser [19]

Referenz	BAFU (Hrsg.) (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt "Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz" (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217. 76 S.						
Zusammenfassung	Synthesebericht des Projekts "Klimaänderungen und Hydrologie in der Schweiz", in welchem die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Schweiz bis zum Jahr 2100 dargestellt werden. Für verschiedene Klimaregionen und Höhenstufen wurden zeitlich und räumlich hochaufgelöste Szenarien des Wasserkreislaufs und der Abflüsse für die Zeitperioden 2035 und 2085 erarbeitet. Besprochen werden die Entwicklung der Häufigkeit von Hoch- und Niedrigwasser sowie der Wassertemperatur.						
Szenarien	CH2011 [3], IPCC 2008 [6], Bosshard et al. 2011 (für diese Studie erarbeitete Klimaszenarien) [2]						
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>	<p>Fazit: <u>Konzepte / Strategie</u></p> <p>Planung</p> <p>Relevanz: <table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr></table></p>	2	1	3
2	1	3					
Raum	Der Untersuchungsraum umfasst die gesamte Schweiz, die für die flächendeckende Untersuchung in 25 Einzugsgebiete unterteilt wurde. Die Resultate werden meist pro Grossregion (z.B. West-, Nord- und Südschweiz) und z.T. auch für das angrenzende Ausland präsentiert.						
Prozess	Der Prozess Wasser steht im Fokus. Es wird der gesamte hydrologische Kreislauf betrachtet. Die Naturgefahr Wasser ist ein Aspekt davon und wird in einem von sieben Modulen des Projekts CCHydro behandelt (Modul "Klimaänderung und Hochwasser").						
Massnahmen	Abgesehen vom Hinweis auf die grosse Bedeutung der permanenten Überwachung (Monitoring) wird nicht auf konkrete Massnahmen eingegangen. Allerdings wird empfohlen, die bestehenden Schutzmassnahmen insbesondere im Mittelland und im Jura zu überprüfen.						
Fazit	Durch das Forschungsprojekt CCHydro wurden wichtige hydrologische Grundlagen für strategische Überlegungen und Entscheidungen bereitgestellt. Gemäss den Autoren erlauben die Resultate erstmals flächendeckend für die ganze Schweiz die zukünftigen Auswirkungen der Klimaänderung auf die einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs abzuschätzen.						
Beurteilung der Relevanz	Die Studie wurde im Hinblick auf die Bereitstellung von wissenschaftlichen hydrologischen Grundlagen zur Erarbeitung einer Anpassungsstrategie an den Klimawandel erstellt und ist demnach für diesen Zweck von grosser Relevanz.						
Besonderheiten	<p>Neben den inhaltlichen Ergebnissen werden Wissenslücken aufgedeckt und es wird aufgezeigt, wie das hydrologische Wissen in der Schweiz vertieft werden kann. Die Autoren kommen zum Schluss, dass weiterer Forschungsbedarf besteht u.a. bezüglich:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Unsicherheiten regionaler Klimamodellierungen - Veränderung der Stärke und Häufigkeit von Starkniederschlägen und der damit verbundenen seltenen Hochwasser (Grösse, Ort und Zeit) <p>Neben offenen hydrologischen Fragestellungen werden Datenlücken aufgezeigt:</p> <ul style="list-style-type: none"> - flächendeckend verfügbare Infos zu hydrologisch relevanten Bodeneigenschaften - Messdaten zur aktuellen Bodenfeuchte und Verdunstung - Genauere Angaben zu den in der Schneedecke gebundenen Wasserreserven <p>Die im Rahmen des CCHydro Projekts erarbeitete Klimaszenarien für die Schweiz bildeten die Basis für weitere Studien (z.B. für [38]).</p>						

Beniston et al. (2018): The European mountain cryosphere [24]

Referenz	Beniston M. et al. (2018): The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. In: The Cryosphere, Volume 12, S. 759 – 794.						
Zusammenfassung	Die Studie gibt einen Überblick über das aktuelle Wissen über Schnee-, Gletscher- und Permafrostprozesse auf dem europäischen Festland, sowie deren vergangene, aktuelle und erwartete künftige Entwicklung. Besonders gewichtet wird das Verständnis der Wechselwirkung zwischen Klima und Kryosphäre und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt. Es wird ausserdem die aktuelle europäische Forschung zur Kryosphäre betrachtet und auf bestehende Lücken und weiteren Forschungsbedarf hingewiesen.						
Szenarien	IPCC 2013 [6]						
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>	<p>Fazit: <u>Konzepte / Strategie</u></p> <p>Planung</p> <p>Relevanz: <table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr></table></p>	2	1	3
2	1	3					
Raum	Es wird die Kryosphäre auf dem europäischen Festland untersucht, v.a. in den europäischen Alpen und Skandinavien. Innerhalb der Schweiz stehen die Prozesse im Hochgebirge im Fokus.						
Prozess	Der Schwerpunkt liegt auf den erwarteten Veränderungen von Gletschern, Permafrost und Schnee im Gebirge. Auch der Wissensstand und bestehende Lücken und Unsicherheiten zu den durch die Veränderungen der Kryosphäre beeinflussten gravitativen Naturgefahrenprozessen Lawinen, Sturz, Rutschungen und Wasser werden ausführlich beschrieben.						
Massnahmen	Als besonders wichtig wird das Monitoring der Kryosphäre hervorgehoben. Weitere Angaben zu Massnahmen werden keine gemacht.						
Fazit	Die Studie ist für die Ausarbeitung von Strategien von grossem Nutzen, da der aktuellste Wissensstand zur europäischen Kryosphäre und den damit verbundenen gravitativen Naturgefahren zusammengefasst und die bestehenden Lücken und Unsicherheiten aufgezeigt werden. Die Kryosphärenforschung fördert nicht nur ein Bewusstsein für die zu erwartenden Veränderungen und die Quantifizierung von Ausmass und Häufigkeit der dort stattfindenden Prozesse, sondern hilft auch bei der Entwicklung von Ansätzen zur Anpassung an diese Veränderungen.						
Beurteilung der Relevanz	Zentrale Studie, die den aktuellsten Wissensstand der Kryosphärenforschung in Europa zusammenfasst. Neben den Prozessbeschreibungen und den jeweiligen Prognosen werden auch Unsicherheiten aufgezeigt und Wissenslücken hervorgehoben und somit Perspektiven und Herausforderungen der zukünftigen Forschung im Bereich der Kryosphäre aufgezeigt.						
Besonderheiten	<p>Besonders bedeutende Quellen von Unsicherheiten bei der Prognose von Veränderungen der Kryosphäre und den damit zusammenhängenden Prozessen und damit Schwerpunkte für die künftige Kryosphärenforschung sind gemäss den Autoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> - die grossen Unsicherheiten bei der Quantifizierung von Hochgebirgsniederschlägen - die numerische Modellierung von Prozessen - das Verständnis von Prozessketten <p>Prognosen sind stark abhängig vom Emissionsszenario und der gewählten Prognosezeit. Nach dem Kenntnisstand der Autoren existieren bisher keine systematischen Studien zu den Wechselwirkungen zwischen Permafrost und Hydrologie im europäischen Gebirge. Obwohl der Wissenszuwachs in der Permafrostforschung in den letzten Jahren enorm war, bestehen immer noch grosse Verständnis- und Forschungslücken in diesem Bereich.</p>						

geo7 (2015): Klimasensitivität Naturgefahren [29][30]

Referenz	geo7 AG (2015b): Klimasensitivität Naturgefahren. BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern. a) Teil 1: Methodenbericht b) Teil 2: Resultate		
Zusammenfassung	Differenzierte Analyse über mögliche relative Veränderungen bei Naturgefahrenprozessen im Zusammenhang mit der Klimaänderung. Gefahrengebiete für die Prozesse Murgang, Übersarung, Überflutung, Hangmuren, Stein- und Blockschlag sowie Lawinen werden ausgeschieden.		
Szenarien	CH2011 [3]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
	<p>Fazit: Konzepte / Strategie</p> <p style="margin-left: 150px;">-----</p> <p>Planung</p> <p>Relevanz: 2 1 3</p>		
Raum	Es werden Sensitivitätsaussagen für Raumeinheiten basierend auf der Einzugsgliederung Schweiz (EZGG-CH) gemacht, die zu Grossregionen (Alpen- und Voralpengebiet, Südschweiz, Mittelland und Jura) zusammengefasst werden. Die gesamte Schweiz ist abgedeckt.		
Prozess	Mögliche Veränderungen von Gerinneprozessen, Lawinen, Sturzprozessen, und Hangmuren werden aufgezeigt.		
Massnahmen	Massnahmen selbst werden nicht erwähnt.		
Fazit	Resultate zeigen eine Gesamtsicht über die zu erwartenden Veränderungstendenzen von gravitativen Naturgefahren. Diese wiederum ermöglichen strategische Massnahmenüberlegungen. Weiter dienen die Resultate als Hilfsmittel bei der Priorisierung von Massnahme und bei der Entscheidung, ob bei der Massnahmenplanung eine detaillierte Analyse der Auswirkungen des Klimawandels angezeigt ist.		
Beurteilung Relevanz	Erstmals wird für die gesamte Schweiz räumlich differenziert dargestellt wo und wie im Zuge des Klimawandels relative Veränderungen bei den gravitativen Naturgefahren zu erwarten sind.		
Besonderheiten	Wegen fehlender oder nicht flächendeckend zur Verfügung stehender Grundlagedaten konnte der Teilprozess permanente Rutschungen nicht untersucht werden. Fehlende Grundlagen verunmöglichen aufbauende Studien. In einem separaten Bericht wird die Methodik für die Sensitivitätsbewertung aufgeführt. [29] Dies soll beim Vorliegen von neuen Grundlagedaten oder bei neuen Erkenntnissen zu Parametern oder Gewichtungen eine erneute Berechnung für einzelne oder alle Prozesse mit vertretbarem Aufwand ermöglichen.		

Prudent-Richard et al. (2008): Changements climatiques dans les Alpes [50]

Referenz	Prudent-Richard G., Gillet M., Vengeon J. und Descotes-Genon S. (2008): Changements climatiques dans les Alpes: impacts et risques naturels. Technischer Bericht. ONERC Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. 99 S.		
Zusammenfassung	Technischer Bericht zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren in den europäischen Alpen. Diese Untersuchung ist Teil des Projekts ClimChAlp – Climate Change Impacts and Adaption Strategies in the Alpine Space, welches die Erarbeitung einer gemeinschaftlichen Strategie der Alpenländer an die Herausforderungen des Klimawandels im Alpenraum sowie die Ausarbeitung von Anpassungsstrategien zum Ziel hat. Der betrachtete technische Bericht von Prudent-Richard et al. fassen das verfügbare Wissen zu den beobachteten und prognostizierten Veränderungen des Naturraums (Gletscher, Schneedecke, Permafrost und Vegetation) sowie der gravitativen Naturgefahren, Stürme und Waldbrände zusammen.		
Szenarien	IPCC 2001, 2007 [6]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
	<p>Fazit: <u>Konzepte / Strategie</u></p> <p>Planung</p> <p>Relevanz: 2 1 3</p>		
Raum	Der Untersuchungsraum ist der gesamte europäische Alpenraum und betrifft neben der Schweiz die Alpenländer Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich und Slowenien.		
Prozess	Hochwasser, Murgänge, Lawinen und Massenbewegungen wie spontane und permanente Rutschungen sowie Steinschlag im Alpenraum werden untersucht und die erwarteten Veränderungen bezüglich Intensität, Frequenz, Saisonalität und räumlichem Auftreten unter Einfluss des Klimawandels aufgezeigt.		
Massnahmen	Massnahmen werden im betrachteten technischen Bericht nicht angesprochen. Das Gesamtprojekts ClimChAlp dient als methodologische Grundlage für die Anpassung der Alpenländer an den Klimawandel. Für weitere Informationen zu möglichen Massnahmen sollten daher weitere Publikationen des Projekts ClimChAlp betrachtet werden (siehe "weitere mögliche Studien von Relevanz" in der Referenzliste).		
Fazit	Die Studie ist sehr umfassend und trägt das Wissen zu den Auswirkungen des Klimawandels aus vielen Feldern zusammen und präsentiert diese nachvollziehbar und systematisch. Das Gesamtprojekt ClimChAlp hatte zum Ziel wissenschaftlich validierte und nachvollziehbare Informationen zum Einfluss des Klimawandels auf den Alpenraum bereitzustellen. Die Publikation von Prudent-Richard et al. sowie weitere Publikationen zum ClimChAlp Projekt können auch zum Fundament für eine in der Schweiz geltende auszuarbeitende Strategie im Umgang mit Naturgefahren beitragen.		
Beurteilung der Relevanz	Im Projekt wurde das gesamte 2008 vorhandene Wissen zum Klimawandel und seinen Auswirkungen im Alpenraum zusammengetragen. Die Resultate sind verständlich, nachvollziehbar präsentiert und geben einen sehr guten Überblick über alle im Alpenraum relevanten gravitativen Naturgefahren und deren prognostizierten Entwicklungen.		

Besonderheiten

Prudent-Richard et al. [50] ist die einzige in diesem Bericht betrachtete Studie, welche die Veränderungen der permanenten Rutschungen im Hinblick auf den Klimawandel detaillierter anspricht. Die inhaltlichen Erkenntnisse zu diesem Thema bleiben aber gering.

Die Relevanz der Identifikation von Unsicherheiten wird verdeutlicht. Denn die Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahrenprozesse ist untrennbar mit der Betrachtung von vielfältigen Unsicherheiten verbunden. [50]

Weitere Publikationen im Rahmen des Projekts ClimChAlp könnten für ein umfassendes Verständnis zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren sowie für Informationen zu möglichen Anpassungsstrategien von Bedeutung sein und sollten genauer untersucht werden (siehe "weitere mögliche Studien von Relevanz" in der Referenzliste).

4.1.2 Massnahmenspezifische Studien

Im Folgenden sind sechs zentrale Studien aufgeführt, in welchen direkte Hinweise auf die Massnahmenplanung gegeben werden.

BAFU (2017): Impulse für eine klimaangepasste Schweiz [20]

Referenz	BAFU (Hrsg.) (2017): Impulse für eine klimaangepasste Schweiz. Erkenntnisse aus 31 Pilotprojekten zur Anpassung an den Klimawandel. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Info Nr. 1703.		
Zusammenfassung	Zur Unterstützung der Kantone, Regionen und Gemeinden beim Umgang mit den neuen Herausforderungen im Zusammenhang mit dem Klimawandel hat das BAFU das Pilotprogramm "Anpassung an den Klimawandel" lanciert. Der Bericht [20] fasst die Erkenntnisse aus 31 im Rahmen der ersten Phase (2013 – 2017) dieses Programms geförderten Projekten zusammen. Es handelt es sich dabei um für Kantone, Regionen oder Gemeinden ausgearbeitete, beispielhafte und konkrete Anpassungsmassnahmen an den Klimawandel. Neben Naturgefahrenmanagement wird der Umgang mit Risiken wie steigender Hitzebelastung, lokaler Wasserknappheit und Veränderung der Ökosysteme beleuchtet. Neben den behandelten Themen ist auch die Spannweite der im Fokus stehenden Räume, Herangehensweisen und die Allgemeingültigkeit der Erkenntnisse sehr gross.		
Szenarien	CH2011 [3], IPCC 2013 [6] und weitere projektspezifische Klimagrundlagen		
Einordnung			
Raum	Regionale und lokale Initiativen zur Anpassung an den Klimawandel wurden gefördert.		
Prozess	Der Fokus bei Betrachtung der Naturgefahren lag auf der Untersuchung des Hochwasserrisikos und der Massenbewegungen. Das spezifisch behandelte Thema ist jeweils Projektabhängig.		
Massnahmen	Die Projekte beschäftigen sich mit sehr unterschiedlichen Herausforderungen und Anpassungsstrategien. Sie zeigen beispielhaft auf, wie sich durch vorausschauendes Denken und Handeln die klimabedingten Risiken vor Ort reduzieren lassen. Sowohl die Fragestellungen der 31 Pilotprojekte als auch ihre Resultate und Produkte sind sehr breit gefächert. Die Zielsetzungen der Projekte lassen sich zwischen den Polen "Wissen schaffen" und "Massnahmen umsetzen" einordnen. [20]		
Fazit	Die Studie zeigt die Bedeutung eines koordinierten Vorgehens der Behörden auf. Die spezifischen inhaltlichen Erkenntnisse und deren konkreter Nutzen sind stark Projektabhängig: Je nach betrachtetem Projekt wurden allgemeine Erkenntnisse erlangt, die bei der Erarbeitung von nationalen Strategien von Bedeutung sind. Die Analyse konkreter Einzelfälle hingegen ermöglicht die Ableitung von Hinweisen für die Massnahmenplanung. Der Synthesebericht gibt einen Überblick über die einzelnen Projekte. Für explizite inhaltliche Fragestellungen muss auf die jeweiligen Projektdokumentationen zurückgegriffen werden.		
Beurteilung der Relevanz	Das Pilotprojekt trug zur Sensibilisierung unterschiedlichste Akteure für die Anpassung an den Klimawandel und zum Ausbau der Wissens- und Handlungsgrundlagen für die Praxis bei. [20] Sowohl spezifische inhaltliche Erkenntnisse der einzelnen Projekte als auch das methodische Vorgehen stellen einen grossen Mehrwert dar.		

Besonderheiten Je nach Fragestellung lohnt sich eine vertiefte Analyse der einzelnen Projektdokumentationen. Das Programm "Anpassung an den Klimawandel" wird weitergeführt. Derzeit läuft die zweite Programmphase (2018 – 2022) mit insgesamt 50 Projekten, deren Resultate einen grossen Mehrwert bringen können und zu gegebener Zeit betrachtet werden sollten (siehe "weitere mögliche Studien von Relevanz" in der Referenzliste)
Die Ergebnisse und Erfahrungen der Projekte können mit meist überschaubarem Aufwand auf andere Gebiete übertragen werden. [20]

Bättig et al. (2011): Anpassung an die Klimaänderung im Berggebiet [22]

Referenz	Bättig M., Rom N. und Dettli R. (2011): Anpassung an die Klimaänderung im Berggebiet. Fallstudie Saastal. Econconcept AG, Zürich. 157 S.		
Zusammenfassung	In einer Fallstudie im Saastal (VS) werden die Auswirkungen des Klimawandels in den vier Bereichen Wasser, Siedlung/Infrastruktur, Biodiversität und Tourismus untersucht und der daraus abgeleitete Handlungsbedarf und die Handlungsoptionen für die Anpassung an die Klimaänderung formuliert. Abschliessend werden Empfehlungen für die zukünftige Entwicklung des Saastals unter Berücksichtigung der klimabedingten Veränderungen ausgearbeitet.		
Szenarien	IPCC 2007 [6], CH2007 [46] und Prognosen aus dem ENSEMBLES-Projekt		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
	<p>Fazit: } Konzepte / Strategie</p> <p style="margin-left: 150px;">Planung</p> <p>Relevanz: </p>		
Raum	Es handelt sich um eine im Saastal (VS) durchgeführte Fallstudie, die vier Gemeinden umfasst und sowohl regionale als auch lokale Erkenntnisse ermöglicht. Direkte Analogieschlüsse auf andere Regionen oder gar die nationale Ebene sind nicht zulässig, da die natürlichen, historischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen in jeder Region einzigartig sind.		
Prozess	Die Entwicklung aller gravitativen Naturgefahrenprozesse (abgesehen von Fels- und Bergstürzen) wird betrachtet. Von Interesse sind insbesondere die Auswirkungen der Prozesse auf Siedlungen und Infrastrukturanlagen. Wasser wird ganzheitlich betrachtet, die Gefahr ist nur ein Teilaspekt.		
Massnahmen	Es wird darauf hingewiesen, dass lokale und prozessspezifische Untersuchungen der Naturgefahrensituation unabdingbar bleiben. Aktuelle Gefahrenkarten werden als zentrale Grundlage für die Massnahmenplanung aufgeführt. Besonders hervorgehoben wird die Bedeutung des Monitorings, für das konkrete Methoden vorgestellt werden, sowie die Relevanz der regelmässigen Überprüfung bestehender Schutzbauten. Die Informationen aus dem Monitoring dienen als Grundlage für die Definition von Massnahmenzielen sowie die verbesserte zeitliche Planung der Massnahmen. Für die langfristige Schutzwirkung des Waldes ist dessen vorsichtiger Umbau zu verstärken. Neben den hier aufgeführten Massnahmentypen wird ebenfalls den umrahmenden Massnahmen wie Administration und Kommunikation grosse Bedeutung beigemessen.		
Fazit	Um eine integrale Wasserbewirtschaftung zu gewährleisten wurde für das Saastal ein Einzugsgebietsmanagement ausgearbeitet, das sowohl Schutz- als auch Nutzeninteressen einbezieht. So wird eine effiziente, regional abgestimmte Wasserbewirtschaftung mit klaren Prioritäten ermöglicht. Die konkreten Empfehlungen für die zukünftige Entwicklung des Saastals dienen als Grundlage für politische, wirtschaftliche und versicherungsrelevante Entscheidungen in den Bereichen Raum- und Ressourcennutzung. Die im Projekt erlangten inhaltlichen Erkenntnisse gelten nur für den spezifischen Raum des Saastals. Das methodische Vorgehensmodell dagegen kann auf andere Regionen angewandt werden.		

Beurteilung der Relevanz	Die Fallstudie zeigt beispielhaft auf, dass eine frühzeitige und proaktive Auseinandersetzung mit dem Klimawandel und seinen Auswirkungen grosse Vorteile für eine Region bringen kann. Die Studie trägt zu einem ganzheitlichen Verständnis des Saastals, sowie der darin erwarteten Veränderungen bei und ermöglicht einen angepassten Umgang mit den künftigen Herausforderungen. Die inhaltlichen Ergebnisse und konkreten Handlungsempfehlungen der Studie bringen für die untersuchte Regionen einen grossen Mehrwert. Der Nutzen der methodologischen Erkenntnisse dieser Studie hingegen sind ebenfalls für weitere Regionen von Bedeutung.
Besonderheiten	Es wird aufgezeigt, dass es in Zukunft guter zu Verfügung stehender Datengrundlagen bedarf um effektive und effiziente Massnahmen der Anpassung an den Klimawandel ableiten zu können. [22] Ebenfalls zentral sind die logische Organisation und Koordination von Anpassungsmassnahmen, klar definierte Zuständigkeiten und die transparente Kommunikation. Die Zusammenarbeit von Kanton und Gemeinde bildet eine wichtige Basis. Da es sich bei der Studie um ein Pilotprojekt handelt, wurde ein Vorgehensmodell für die Durchführung analoger Projekte in anderen Regionen entwickelt. [22]

Bebi et al. (2016): Auswirkungen Klimawandel auf Schutzwald und Naturgefahren [23]

Referenz	Bebi P., Bugmann H., Lüscher P., Lange B. und Brang P. (2016): Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In: Pluess A.R., Augustin S. und Brang P. (Red.): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. Haupt Bern, Stuttgart, Wien. S.269 – 285.		
Zusammenfassung	Die Studie zeigt die im Zuge des Klimawandels erwarteten Änderungen bis Ende des 21. Jahrhunderts der Schutzwirkung des Waldes in der Schweiz auf. Je nach Standort, Naturgefahr und betrachtetem Zeithorizont wirkt sich der Klimawandel unterschiedlich aus. Die Schutzwirkung wird daher sowohl prozess- als auch standortspezifisch analysiert.		
Szenarien	CH2011 [3]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
	<p>Fazit: } Konzepte / Strategie</p> <p style="margin-left: 150px;">Planung</p> <p>Relevanz: </p>		
Raum	"Kältelimitierte", "mittlere" und "trockenheitslimitierte" Standorte des Schutzwaldes in der gesamten Schweiz werden untersucht. Die in der Studie gewonnenen Erkenntnisse gelten aber ebenfalls auf regionaler Ebene und ermöglichen sogar allgemeine Aussagen für den lokalen Raum.		
Prozess	Der Fokus liegt auf der Wirkung des Schutzwaldes auf alle gravitativen Naturgefahrenprozesse und weniger auf der Analyse der Prozesse an sich.		
Massnahmen	Die Wirkung des Schutzwaldes wird sowohl standort- als auch prozessspezifisch analysiert und das Schutzwaldmanagement differenziert betrachtet. Konkrete Empfehlungen zum Schutzwaldmanagement werden gegeben.		
Fazit	Die Erkenntnisse in Bezug auf die künftige Wirkung des Waldes auf die verschiedenen Naturgefahrenprozesse an verschiedenen Standorten sind zentral für das Schutzwaldmanagement. Sie müssen bei der konkreten Planung ingenieurbioologischer Massnahmen berücksichtigt werden und sollten auch in die Ausarbeitung übergeordneter Konzepte des Naturgefahrenmanagements einfließen.		
Beurteilung der Relevanz	Synthesebericht mit grossem Informationsgehalt, der einen guten Überblick über das Thema Schutzwald und Naturgefahren gibt. Neben inhaltlichen Erkenntnissen wird aufgezeigt welches Wissen zum Thema vorhanden ist und wo noch Unsicherheiten und/oder Forschungslücken bestehen.		
Besonderheiten	Es handelt sich um die einzige in dieser Zusammenstellung betrachtete Studie, die von der Massnahme (Schutzwald) ausgeht und die verschiedenen Naturgefahren aus diesem Blickwinkel heraus betrachtet. Dies ermöglicht eine neue Sichtweise auf die Prozesse. Der Schutzwald ist insbesondere daher von Interesse, da er natürlich nachwächst und als kostengünstigster und zugleich ökologisch wertvollster Schutz vor Naturgefahren gilt (Brang et al. 2006 in [23]). In der Schweiz hat rund die Hälfte der Waldfläche eine Schutzwirkung bei Naturgefahren (Losey und Wehrli 2013 in [23])		

Kenner und Phillips (2017): Fels- und Bergstürze in Permafrost Gebieten [36] [37]

Referenz	Kenner R. und Phillips M. (2017a/b): ARGE Alp Projekt Fels- und Bergstürze in Permafrost Gebieten. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. a) Einflussfaktoren, Auslösemechanismen und Schlussfolgerungen für die Praxis. Schlussbericht. b) Hinweise für die Praxis zum Umgang mit Felsinstabilitäten im Permafrost. Erkenntnisse.						
Zusammenfassung	Zusammenfassung des Stands der Forschung zu Felsstürzen im Permafrost (a) [36] Neben Permafrost werden weitere Faktoren vorgestellt, welche die Stabilität von Felswänden beeinflussen. Ihr jeweiliges Zusammenspiel und ihre Beeinflussung durch den Klimawandel wird analysiert und beschrieben. (a) [36] Weiter werden ganz konkrete Angaben zum Umgang mit Felsinstabilitäten im Permafrost gemacht – diese gelten bereits heute und werden in Anbetracht des Klimawandels ihre Bedeutung beibehalten. (b) [37]						
Szenarien	Scherrer et al. 2016 [52]						
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>	<p>Fazit: <u>Planung</u></p> <p>Relevanz: <table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr></table></p>	2	1	3
2	1	3					
Raum	Die Untersuchung bezieht sich auf Felsstürze im hochalpinen Terrain, in welchem Permafrost nachgewiesen oder zumindest wahrscheinlich ist. Die Erkenntnisse und insbesondere die Empfehlungen für die Massnahmenplanung gelten national und müssen im Lokalen umgesetzt werden.						
Prozess	Untersucht werden ausschliesslich hochalpine Felsstürze.						
Massnahmen	Da sich Felssturzereignisse durch Felsdeformationen ankündigen und ihre frühzeitige Erkennung daher möglich ist, ist Monitoring in diesem Zusammenhang von besonderer Bedeutung. Konkrete Messmethoden für instabile Felswände werden präsentiert und verglichen. Konkrete Empfehlungen für den Umgang mit instabilen, hochalpinen Permafrostfelswänden werden gegeben. Bauvorhaben in Gebieten mit Felswandinstabilitäten sind zu verhindern. [37]						
Fazit	Konkrete Praxishinweise für den Umgang mit Felsinstabilitäten im Permafrost werden gegeben. Insbesondere Teil b) der Studie ist daher für konkrete Planungszwecke bedeutend. [37] Aufgrund der Fokussierung auf einen spezifischen Prozess (Felssturz) in einem beschränkten Gebiet (Permafrost), sind die in der Studie erlangten allgemeinen Erkenntnisse nur bedingt hilfreich bei der Ausarbeitung einer allgemeinen Strategie zum Umgang mit Naturgefahren.						
Beurteilung der Relevanz	Es wird zwar nur ein ganz spezifischer Unterprozess (Felssturz) in einem ganz spezifischen Raum (Permafrostgebiet) untersucht. Die daraus abgeleiteten Hinweise für die konkrete Gebiets- und prozessspezifische Massnahmenplanung sind aber von Bedeutung.						
Besonderheiten	Der Klimawandel wirkt als Katalysator für Felsstürze. Der Prozess selbst ist aber Endpunkt eines z.T. Jahrtausende andauernden Gesamtprozesses der Destabilisierung und ist von vielen verschiedenen Faktoren abhängig (u.a. strukturelle Prädisposition, Permafrost, kryostatischer Druck, thermomechanische Prozesse, Gletscher und Starkniederschläge). [36]						

KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz [38]

Referenz	KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. KOHS Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband. In: Wasser, Energie, Luft, 99. Jahrgang, Heft 1, S. 55 – 57.		
Zusammenfassung	Das Standortpapier zeigt, wie nach Ansicht der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS) die Klimaänderung im Hochwasserschutz berücksichtigt werden muss. Die abgegebenen, allgemein gehaltenen Empfehlungen für die Massnahmenplanung stellen die aktuell in der Schweiz geltenden Grundsätze für den Hochwasserschutz dar.		
Szenarien	Schädler et al. 2007 [11]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
	<p>Fazit:</p>		<p>Relevanz:</p>
Raum	Allgemeine Empfehlungen für den Hochwasserschutz in der Schweiz werden abgegeben. Die aufgrund des Klimawandels zu erwartenden Veränderungstendenzen der Hochwasserabflüsse werden für drei Grossregionen beschrieben: Gebiete unterhalb 1500 m ü. M., Gebiete in den (Nord-) Alpen über 1500 m ü. M. und Gebiete auf der Alpensüdseite. Massnahmenempfehlungen sind sehr allgemein gehalten, gelten in ihren Grundsätzen aber ebenfalls für den regionalen und lokalen Raum.		
Prozess	Im Fokus stehen Hochwasserprozesse: Überschwemmung, Erosion, Ablagerung von Sedimenten, Murgänge und Verstopfung von Engnissen durch Schwemmholz. Am Rande wird die zunehmende Gefahr von Hangrutschungen in den Voralpen erwähnt.		
Massnahmen	Allgemeine, qualitative Empfehlungen für bauliche Massnahmen werden abgegeben und die Bedeutung und Grundsätze für raumplanerische und organisatorische Massnahmen aufgezeigt.		
Fazit	Die aufgeführten qualitativen Empfehlungen entsprechen der aktuell in der Schweiz geltenden Strategie für einen nachhaltigen Schutz vor Hochwasser. Bei der konkreten Massnahmenplanung müssen diese allgemeinen Grundsätze berücksichtigt werden.		
Beurteilung Relevanz	Dieses Standortpapier hat grosse Relevanz, da darin die bis heute in der Schweiz geltenden Grundsätze des Hochwasserschutzes dargelegt werden.		
Besonderheiten	Zum Zeitpunkt der Erstellung des Standortpapiers konnte der Einfluss der Klimaänderung auf zukünftige Hochwasserereignisse in der Schweiz erst als Trend vorausgesagt werden. Heute sind detailliertere Klimagrundlagen vorhanden anhand derer die Empfehlungen bzgl. Hochwasserschutz angepasst werden könnten (siehe [4]).		

Nauser (2016): Das Wallis angesichts des Klimawandels [44]

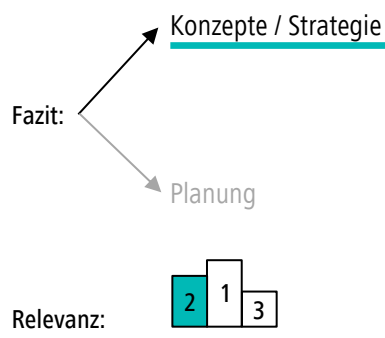
Referenz	Nauser M. (2016): Das Wallis angesichts des Klimawandels – Auswirkungen und Anpassungsoptionen in den Bereichen Wasserbewirtschaftung und Naturgefahren (Synthesepapier). Dienststelle für Wald und Landschaft, Sektion Naturgefahren, Sion.				
Zusammenfassung	In einem Synthesepapier werden alle bis zum Sommer 2015 verfügbaren Befunde zu den Auswirkungen des Klimawandels in den Bereichen Wasserbewirtschaftung und Naturgefahren sowie zu möglichen Anpassungsmassnahmen im Kanton Wallis zusammengefasst.				
Szenarien	CH2011 [3]				
Einordnung		<p><u>Konzepte / Strategie</u></p> <p><u>Planung</u></p> <p>Relevanz: <table border="1"><tr><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr></table></p>	2	1	3
2	1	3			
Raum	Beschrieben werden die Entwicklungen im gesamten Kanton Wallis und dabei wenn möglich und nötig auf verallgemeinerbare Unterschiede in Teilbereichen des Kantons eingegangen.				
Prozess	Zusammengetragen werden die Erkenntnisse in Bezug auf den Stand und die Entwicklungstrends von Wassergefahren (Murgänge und Hochwasser), Rutschungen, Felssturz und Steinschlag sowie Lawinen. Zusätzlich betrachtet werden gefährliche Gletscher.				
Massnahmen	Pro betrachtetem Naturgefahrenprozess werden Handlungsoptionen dargelegt. Diese sind zwar allgemein formuliert, beziehen sich aber jeweils auf ganz konkrete Massnahmen wie z.B. periodischen Aktualisierung von Gefahrenkarten, Berücksichtigung klimabedingter Entwicklungstendenzen bei der Dimensionierung von baulichen Schutzmassnahmen, Monitoring von Permafrostgebieten, Empfehlungen für den Unterhalt von Bächen, Anlagen und Schutzbauten, oder Hinweise für die Schutzwaldpflege. Darauf aufbauend werden als eine Art Schlussfolgerung allgemeine Prinzipien aufgeführt, die sich als Leitplanken im Umgang mit Naturgefahren bewährt haben. [44]				
Fazit	Das Synthesepapier kann eine wertvolle Grundlage darstellen sowohl für die Ausarbeitung allgemeiner Strategien als auch bei konkreten Planungsvorhaben, da hier die aktuellsten verfügbaren Erkenntnisse zum Klimawandel und seinen möglichen Auswirkungen auf die Naturgefahren für den Kanton Wallis inkl. Quellenangaben zusammengefasst sind.				
Beurteilung der Relevanz	Sehr informative Zusammenstellung aller zum Zeitpunkt der Berichtverfassung verfügbaren wissenschaftlichen Befunde aus der Fachliteratur. Unsicherheiten werden offengelegt. Die inhaltlichen Erkenntnisse gelten nur für den Kanton Wallis. Das Synthesepapier zeigt aber den Mehrwert auf, der sich aus der Synthese aller Erkenntnisse aus der Fachliteratur und deren strukturierter Darstellung und transparenter Dokumentation ergibt. Dies kann als Vorbild dienen für weitere Synthesepapiere mit Fokus auf andere Regionen der Schweiz.				
Besonderheiten	Es wird explizit auf die bestehenden Unsicherheiten und fehlenden Informationen aufmerksam gemacht. Auch das Wissen über fehlende oder nicht gesicherte Aussagen zu Entwicklungstrends verschiedener Naturgefahrenprozess ist relevant sowohl für die Ausarbeitung von allgemeinen Konzepten als auch für die konkrete Massnahmenplanung.				

4.2 Studien mit mittlerer Relevanz

Die als weniger zentral bewerteten Studien liefern ebenfalls interessante inhaltliche Informationen und methodische Erkenntnisse die z.T. als Basis für weitere Untersuchungen dienen können.

AG NAGEF (2010): Fakten und Szenarien zum Klimawandel und Naturgefahren im Kanton Bern [13]

Referenz	AG NAGEF (2010): Fakten und Szenarien zum Klimawandel und Naturgefahren im Kanton Bern. Faltblatt. AG NAGEF Arbeitsgruppe Naturgefahren des Kanton Bern, Bern.		
Zusammenfassung	In einem siebenseitigen Faktenblatt wird zunächst der in der Schweiz und v.a. im Kanton Bern zu erwartende Klimawandel anhand von Fakten und Beispielen veranschaulicht. Anschliessend wird auf je einer Seite beschrieben, welche erwarteten Auswirkungen die klimatischen Veränderungen auf die Naturgefahrenprozesse Hochwasser, Lawinen, sowie Sturz- und Rutschprozesse haben werden. Pro Prozess werden grundsätzliche Empfehlungen für die Gefahrenbeurteilung, Gefahrenabwehr und Risikominimierung abgegeben.		
Szenarien	CH2007 [47]		
Einordnung			
Raum	Regionale und jahreszeitliche Auswirkungen des globalen Klimawandels auf den Kanton Bern werden untersucht. Im Fokus steht die Entwicklung im Alpenraum.		
Prozess	Es wird aufgezeigt wie der Klimawandel die Prozesse Hochwasser (Überschwemmungen, Ufererosion, Übersarung und Murgänge), Lawinen und Massenbewegungen (Steinschläge, Felsstürze, Bergstürze, Rutschungen und Hangmuren) beeinflusst.		
Massnahmen	Ganz allgemein werden pro betrachtetem Naturgefahrenprozess Empfehlungen abgegeben, wie in Zukunft Risiken minimiert und Gefahren abgewehrt werden können.		
Fazit	Das Faktenblatt liefert eine kurze und übersichtliche Zusammenstellung über die im Zusammenhang mit dem Klimawandel zu erwartenden Veränderungen der gravitativen Naturgefahren im Alpenraum im Kanton Bern und wie darauf reagiert werden kann. Es bietet keine vertieften Analysen mit quantitativen Werten oder spezifischen Aussagen zu räumlichen Veränderungen und eignet sich daher nicht als Planungsgrundlage. Die nachvollziehbar dargestellten Massnahmenempfehlungen liefern aber wertvolle Erkenntnisse, die in allgemeinen Strategien und Konzepten berücksichtigt werden sollten.		
Beurteilung der Relevanz	Die im Kanton Bern relevanten Naturgefahrenprozesse und deren zu erwartenden Veränderungen werden knapp und anschaulich beschrieben, jedoch nicht vertieft analysiert.		
Besonderheiten	Kurze und prägnante Aussagen, die anhand von Beispielen (Text, Bilder, Graphiken) illustriert werden, machen die Publikation interessant und die Inhalte für eine breite Leserschaft eindrücklich und verständlich. Die Studie wird im aktuellen Pflichtenheft des Kt. Bern für die Revision bestehender Gefahrenkarten zitiert, und darauf hingewiesen, dass hier die wichtigsten derzeit möglichen Aussagen bezüglich Klimawandel aufgeführt sind.		



BABS (2019): Starkniederschläge und Einsatzplanung Schutz & Rettung Zürich [18]

Referenz	BABS (Hrsg.) (2019): Starkniederschläge und Einsatzplanung von Schutz & Rettung Zürich – Studie von der geo7 AG im Rahmen des National Centre für Climate Services NCCS. Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), Bern.		
Zusammenfassung	Der Zusammenhang zwischen Starkniederschlägen und den Einsätzen von Feuerwehren wird am Beispiel des Kantons Zürich und der Organisation von Schutz & Rettung Zürich (SRZ) untersucht. Es wird abgeschätzt wie sich aufgrund des Klimawandels und der Bevölkerungs- bzw. Siedlungsentwicklung die Zahl der Einsätze in den nächsten 20 Jahren entwickeln wird und wie sich die Einsätze qualitativ verändern werden. Neben den inhaltlichen Resultaten wird die Untersuchungsmethode beschrieben, die gegebenenfalls auf weitere Prozesse oder Gebiete angewandt werden kann.		
Szenarien	CH2011 [3]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
	<p>Fazit: Konzepte / Strategie Planung</p> <p>Relevanz: </p>		
Raum	Pilotstudie mit Fokus auf den Kanton Zürich.		
Prozess	Untersucht wird die in Folge von Starkniederschlägen ausgelöste Einsatzfähigkeit von SRZ, die auf den Prozess Wasser (Überschwemmung durch Gewässer oder Oberflächenabfluss) zurückzuführen ist.		
Massnahmen	Die Studie gibt Auskunft über die aktuelle bzw. künftig erwartete Belastung der Einsatzkräfte. In naher Zukunft (ca. 20 Jahre) beeinflusst die Siedlungsentwicklung die Gefährdungssituation im Kanton Zürich stärker als der Klimawandel.		
Fazit	Die Studie liefert Grundlagen für die Disposition der Einsatzkräfte im Kanton Zürich und kann die Abschätzung des Mittelbedarfes unterstützen. Die inhaltlichen Resultate sind nicht auf andere Gebiete oder Prozesse übertragbar, wohl aber die Methode, die im Bericht ebenfalls beschrieben ist.		
Beurteilung der Relevanz	Ganz konkrete Auswirkungen des Klimawandels auf die Tätigkeit von Einsatzkräften werden untersucht. Die inhaltlichen Ergebnisse der Studie können nicht auf andere Regionen oder Prozesse übertragen werden. Einen Mehrwert könnte die Weiterführung der erarbeiteten Methode oder deren Anwendung auf andere Regionen und/oder Prozesse bringen.		
Besonderheiten	Grosse Bedeutung für die Einsatzfähigkeit im Kanton Zürich hat der Oberflächenabfluss. Wie dieser durch den Klimawandel beeinflusst wird, wurde bisher aber noch nicht untersucht.		

Brunner et al. (2019): Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions [25]

Referenz	Brunner M. I., Farinotti D., Zekollari H., Huss M. und Zappa M. (2019): Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. In: Hydrology and Earth System Science, Volume 23, S. 4471 – 4489.		
Zusammenfassung	In der Studie wird mit zwei unterschiedlichen Methoden (zum einen basierend auf beobachteten Abflussdauerkurven und zum anderen auf der Grundlage von stochastisch generierten Zeitreihen) die Entwicklung der Abflussregime in den Alpen untersucht. Es wird gezeigt, dass unterschiedliche Abflussregime auch unterschiedlich auf den Klimawandel reagieren. Neben den inhaltlichen Resultaten werden die beiden angewendeten Methoden verglichen.		
Szenarien	Beniston et al. 2018 [24] und weitere Einzelautoren		
Einordnung			
Raum	19 hydrologische Einzugsgebiete der Schweiz werden untersucht.		
Prozess	Es wird nicht der Naturgefahrenprozess Wasser an sich betrachtet, sondern die Veränderung der Extreme der Abflussregime.		
Massnahmen	Es wird aufgezeigt, dass nicht nur einzelne (extreme) Abflusswerte von Bedeutung sind, sondern deren Einordnung in eine Abflussganglinie, die ebenfalls die Bedingungen vorher und nachher aufzeigt. Dies sollte bei der Massnahmenplanung berücksichtigt werden. Direkte Angaben zur Massnahmenplanung werden keine gegeben.		
Fazit	Die Ergebnisse bieten eine allgemeine Orientierungshilfe bei der Planung und Bewirtschaftung von Wasserressourcen und sollten bei der Ausarbeitung von grundsätzlichen Strategien berücksichtigt werden. Die Schätzungen der Extremregime sind eine wertvolle Grundlage für die Erarbeitung von Strategien für das Wassermanagement im Allgemeinen und den Hochwasserschutz im Speziellen.		
Beurteilung der Relevanz	Die Darstellung der künftigen Entwicklung der Abflussregime hilft, den Prozess Wasser als Ganzes besser zu verstehen. Diese gesamtheitliche Betrachtungsweise ist bei der Strategieentwicklung für ein nachhaltiges Wassermanagement zentral. Die Studie fokussiert auf extreme Abflüsse und nicht auf den Gefahrenprozess Wasser.		
Besonderheiten	Aufgrund des Klimawandels verändern sich nicht nur die Extremabflüsse, sondern die gesamten Abflussregime. Die verschiedenen, den Modellierungen zugrunde liegenden Klimaszenarien haben grösseren Einfluss auf die Resultate als die Wahl der Modellparameter.		

geo7 (2017): Gefahrenbeurteilung Fellbach – Prozess Wasser [31]

Referenz	geo7 AG (2017): Gefahrenbeurteilung Fellbach, Prozess Wasser. Technischer Bericht.		
Zusammenfassung	Detaillierte Gefahrenbeurteilung der Wasserprozesse im Fellbach in der Gemeinde Saas-Balen (VS). Aufgrund der komplexen Wechselwirkungen im Einzugsgebiet wurden ebenfalls die Aspekte Gletscher und Permafrost, sowie deren zeitlicher Verlauf in der Vergangenheit sowie in Bezug auf künftige Klimaszenarien (ca. 2035 und 2060) untersucht.		
Szenarien	CH2011 [3]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
			<p>Fazit: } Konzepte / Strategie</p> <p>Planung</p> <p>Relevanz: </p>
Raum	Gefahrenbeurteilung der Prozesse im Einzugsgebiet und im Gerinne des Fellbachs (VS).		
Prozess	Fokus auf Wasserprozesse (Murgang, Überflutung und Übersarung, Ufererosion) und ihre Beeinflussung durch Gletscher- und Permafrostprozesse.		
Massnahmen	Die Gefahrenkarte muss bei der Raumplanung berücksichtigt werden. Ein Beobachtungskonzept für den Fellbach wurde ausgearbeitet und ist im technischen Bericht enthalten. Die Gefahrenbeurteilung bietet die Grundlage für die Abklärung des Handlungsbedarfs sowie für die Ausarbeitung von baulichen, raumplanerischen, organisatorischen sowie ingenieurbioologischen Massnahmen.		
Fazit	Die Gefahrenkarte Fellbach ist bei raumwirksamen Tätigkeiten in der Gemeinde Saas-Balen zu berücksichtigen und bietet eine Grundlage für die Planung der Massnahmen zum Schutz vor Wassergefahren. Ein konkreter Einzelfall wird analysiert. Allgemeine Aussagen als Basis für nationale Strategien werden keine gemacht. Der technische Bericht macht aber deutlich, dass der Einbezug des Klimawandels in die Gefahrenbeurteilung von grosser Bedeutung sein kann.		
Beurteilung der Relevanz	Fokus der Gefahrenkarte liegt auf dem Einzugsgebiet des Fellbachs, die erarbeiteten Resultate haben nur für diesen speziellen, lokalen Raum Gültigkeit. Den Klimawandel in der Gefahrenbeurteilung zu berücksichtigen ist hingegen von schweizweit zentraler Bedeutung! Es wird beispielhaft aufgezeigt wie der Klimawandel konkret bei der Erstellung von Gefahrenkarten betrachtet werden kann.		
Besonderheiten	<p>In dynamischen Einzugsgebieten kann innerhalb kurzer Zeit eine andere Gefährdungslage möglich sein. In solchen Gebieten ist der Einbezug des Klimawandels in die Gefahrenbeurteilung zentral.</p> <p>In Gebieten an der heutigen Permafrost- oder Gletschergrenze sind in Zukunft grosse Veränderungen zu erwarten. Um diese zu erkennen, haben gut abgestimmte Beobachtungs-, Alarm- und Notfallkonzepte höchste Priorität bei der Massnahmenplanung.</p>		

geo7 AG (2019): Klimasensitivität Naturgefahren. Pilotprojekt Val d'Hérens [32]

Referenz	geo7 AG (2019): Klimasensitivität Naturgefahren. Fachbericht Pilotprojekt Val d'Hérens. BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern.		
Zusammenfassung	Die in geo7 2015 [29] entwickelte Methodik zur Beurteilung der Klimasensitivität von Naturgefahrenprozessen wird auf das Val d'Hérens (VS) angewandt. Untersucht werden die erwarteten Veränderungen im Naturraum in Bezug auf die Schneedecke, das Permafrost- und Gletschervorkommen, sowie bei den gravitativen Naturgefahrenprozessen. Neben den inhaltlichen Resultaten, die im Vergleich zu geo7 2015 ([29] und [30]) ebenfalls die Prozesse Rutschungen und Wassertaschenausbrüche beinhalten, werden die übergeordnete Methodik und die Resultate aus [29] im Lokalen überprüft und wo nötig verfeinert bzw. verbessert. Die Prozesse, deren erwartete Beeinflussung durch den Klimawandel sowie das angewandte Verfahren werden transparent und nachvollziehbar präsentiert.		
Szenarien	CH2011 [3] für das Projekt wurden räumlich differenzierte Klimaszenarien auf lokaler Stufe hergeleitet		
Einordnung			
Raum	Untersuchungsraum ist das Val d'Hérens (inkl. Val d'Hérémence) (VS).		
Prozess	Es werden die Veränderungstendenzen der Naturgefahrenprozesse Sturz (Steinschlag, Felssturz), Lawinen, Rutschungen (Hangmuren, mittelgründige Rutschungen), Wildbachgefahren und Wassertaschenausbrüche untersucht. Letzterer Prozess sowie Rutschungen waren in [29] und [30] noch nicht enthalten.		
Massnahmen	Massnahmen werden keine angesprochen.		
Fazit	Die erwarteten relativen Veränderungen bei gravitativen Naturgefahrenprozessen im Val d'Hérens sind für regionale und z.T. auch lokale Anpassungsstrategien von zentraler Bedeutung. Neben den inhaltlichen Ergebnissen liegt der Mehrwert der Studie aber insbesondere darin, dass aufgezeigt wird, dass die in [29] entwickelte Methodik in lokalen Gebieten angewandt werden kann und dass der Einbezug detaillierterer Grundlagedaten die Aussagekraft der Resultate erhöht.		
Beurteilung der Relevanz	Die Resultate selbst sind einzig für die untersuchte Region von grosser Bedeutung. Das Vorgehen und die Überprüfung und Anpassung der Methode aus [29] bringt auch national einen grossen Mehrwert.		
Besonderheiten	Der Einbezug von gebietsspezifischen Informationen sowie detaillierten Klimaprognosen bringen einen Mehrwert in Bezug auf die Nachvollziehbarkeit und Aussagekraft der Resultate. Der Einsatz eines Fuzzy-Logic Ansatzes, der anstelle von scharfen numerischen Grenzen Übergangsbereichen betrachtet, scheint im Hinblick auf die bestehenden Unsicherheiten in Bezug auf die Prozesse selbst und auf deren Beeinflussung durch den Klimawandel sinnvoll und nachvollziehbar.		

Gobiet et al. (2014): 21st century climate change in the European Alps [33]

Referenz	Gobiet A., Kotlarski S., Beniston M. Heinrich G., Rajczak J. und Stoffel M. (2014): 21st century climate change in the European Alps. In: Science of The Total Environment. Volume 493, S. 1138 – 1151.		
Zusammenfassung	Der zum Klimawandel in den Alpen vorhandene Wissensstand wird auf Basis der im Jahr 2014 vorhandenen Literatur zusammengefasst und mit regionalen Auswertungen ergänzt. Neben der Entwicklung der Klimaindikatoren (Temperatur, Niederschlag, Strahlung und relative Luftfeuchtigkeit) werden die eng damit verbundenen Auswirkungen in den Bereichen Überschwemmungen, Trockenperioden, Schneebedeckung und Massenbewegungen analysiert.		
Szenarien	CH2011 [3]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
	<p>Fazit: <u>Konzepte / Strategie</u></p> <p>Planung</p> <p>Relevanz: </p>		
Raum	Der Fokus liegt auf dem Alpenraum.		
Prozess	Betrachtet werden Naturgefahren ausgelöst durch die sich wandelnde Kryosphäre, nämlich Murgänge, Rutsch- und Sturzereignisse. Zudem werden die erwarteten Veränderungen von Überflutungen besprochen.		
Massnahmen	Es wird verdeutlicht, dass Veränderungen des Klimasystems und der dadurch beeinflussten Prozesse erhebliche Auswirkungen auf die Ökosysteme, die Gesellschaft und ihre Anpassungsfähigkeit haben werden. Konkrete Massnahmen werden aber keine angesprochen.		
Fazit	Das zusammengetragene Wissen über das sich verändernde Klima und die damit zusammenhängende Wandlung im Naturraum ist für die Ausarbeitung nationaler Strategien von Bedeutung. Für Planungszwecke sind die in der Studie gemachten Angaben zu allgemein.		
Beurteilung der Relevanz	Der Synthesebericht gibt eine gute Übersicht über die zu erwartenden Veränderungen in den Alpen, insbesondere in der Kryosphäre und den dadurch beeinflussten Naturgefahren. Er ist aber deutlich weniger umfassend und aktuell als [17] oder [24].		
Besonderheiten	<p>Explizit berücksichtigt und angesprochen werden die Zuverlässigkeit und Unsicherheiten von Klimaprojektionen.</p> <p>In den Alpen stehen einige der weltweit längsten Beobachtungsreihen von Klimaparametern und ein vergleichsweise dichtes Beobachtungsnetz zur Verfügung.</p> <p>Im Zuge des Klimawandels kann es zu Naturgefahrenereignissen bisher ungekannten Ausmasses und zu Kaskadenprozessen und Kettenreaktionen kommen.</p>		

Köplin (2012): Hydrological impacts of climate change in Switzerland during the 21st century [39]

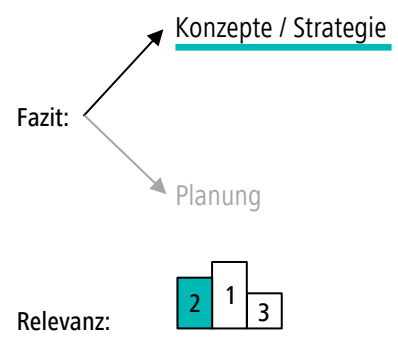
Referenz	Köplin N. (2012): Hydrological impacts of climate change in Switzerland during the 21st century. Inauguraldissertation, Philosophisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Bern, Bern.			
Zusammenfassung	Die Auswirkungen des Klimawandels auf mesoskalige Einzugsgebiete in der Schweiz bis Ende des 21. Jahrhunderts, insbesondere die Bedeutung von Gletscherrückgang und Waldzunahme sowie Änderungen in den Hochwasserabflüssen werden untersucht. Die Dissertation ist Teil des Projekts CCHydro. [19]			
Szenarien	CH2011 [3]			
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>	<p>Fazit: <u>Konzepte / Strategie</u></p> <p>Planung</p> <p>Relevanz: </p>
Raum	Die Untersuchung beruht auf der Analyse 189 mesoskaliger hydrologischer Einzugsgebiete, welche die gesamte Bandbreite der in der Schweiz auftretenden Regimetypen abdecken. Die Untersuchungsgebiete wurden in fünf Regionen unterteilt (Jura, Mittelland, Alpen, inneralpine Gebiete und südliches Alpengebiet) wo jeweils das künftige Abflussverhalten eines Fallstudieneinzugsgebiet im Detail analysiert wurde.			
Prozess	Es werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflüsse untersucht mit besonderem Augenmerk auf die erwarteten Veränderungen der Hochwasserabflüsse. Analysiert werden die Veränderungen der mittleren und maximalen jährlichen Hochwasser und deren Saisonalität.			
Massnahmen	Massnahmen werden nicht direkt angesprochen.			
Fazit	Die Untersuchung der Abflussregime trägt zu einem gesamtheitlichen Verständnis der erwarteten Abflussänderungen bei und sollte bei der Entwicklung nationaler Strategien zum Umgang mit dem Klimawandel berücksichtigt werden. Die Resultate der Studie stellen wertvolle quantitative Informationen zu den hydrologischen Auswirkungen der Klimaänderung dar. Zudem bilden die erarbeiteten wissenschaftlichen Grundlagen die Basis für fundierte und nachhaltige Anpassungsmassnahmen. [39]			
Beurteilung der Relevanz	Die gesamte Dissertation von Köplin mit detaillierter Analyse der verwendeten Methoden ist für den vorliegenden Zweck wohl zu ausführlich, die Inhalte des Kapitel 4 "Floods" aber durchaus von Bedeutung. Denn hier wird aufgezeigt, dass die Veränderung der Hochwassersaisonalität eine Folge der veränderten Regimetypen ist. Das gesamtheitliche Verständnis der Veränderungen des Abflussverhaltens im Zuge des Klimawandels ist demnach von grosser Bedeutung für die Ausarbeitung eines nachhaltigen Wassermanagements. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Studie wurden bereits in das Projekt CCHydro [19] integriert.			
Besonderheiten	Die wichtigste Unsicherheitsquelle bei hydrologischen Klimafolgestudien ist das verwendete Klimaszenario. Es wird daher empfohlen, Analysen auf einem Ensemble von Szenarien abzustützen. [39]			

Marty et al. (2009): Klimaänderung und Naturgefahren in Graubünden [41]

Referenz	Marty C., Phillips M., Lehning M., Wilhelm C. und Bauder A. (2009): Klimaänderung und Naturgefahren in Graubünden. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. Volume 160, S. 201 – 209.		
Zusammenfassung	Im Artikel werden grob die im Kanton Graubünden zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels in Bezug auf Grosslawinen, Überschwemmungen, Murgänge, Hangrutschungen und Felsstürze sowie auftauenden Permafrost und schmelzende Gletscher aufgezeigt und allgemeine Aussagen zu Schutzmassnahmen gemacht.		
Szenarien	CH2007 [46], Beniston et al. 2007 [1]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
	<p>Fazit: </p> <p>Relevanz: </p>		
Raum	Fokus liegt auf dem Kanton Graubünden.		
Prozess	Die Grundzüge und die hauptsächlich zu erwartenden Veränderungen der Prozesse Überschwemmungen, Murgänge, Hangrutschungen, Felsstürze und Grosslawinen werden beschrieben.		
Massnahmen	Es wird auf die Bedeutung von Mess-, Informations- und Warnsystemen, Interventionskarten, Gefahrenbeurteilungen und die Instandstellung von bestehenden Schutzbauten hingewiesen. Konkrete Aussagen zur Massnahmenplanung werden keine gemacht.		
Fazit	Ein einfach verständlicher Überblick über die im Zusammenhang mit dem Klimawandel im Kanton Graubünden zu erwartenden, qualitativen Veränderungen der Naturgefahrenprozesse wird gegeben. Diese Informationen könnten bei der Ausarbeitung von Strategien im Umgang mit dem Klimawandel in Graubünden hilfreich sein. Die gemachten Aussagen sind allerdings wenig vertieft und nicht ausreichend für konkrete Planungszwecke.		
Beurteilung der Relevanz	Die Studie liefert einen Überblick über die im Kanton Graubünden zu erwartenden Veränderungen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind vergleichbar mit den Erkenntnissen aus dem Kanton Bern. [13]		
Besonderheiten	Die möglichen Aussagen zum Verhalten der gravitativen Naturgefahrenprozesse im Hinblick auf den Klimawandel sind nicht nur abhängig davon wie intensiv sie erforscht wurden, sondern insbesondere auch von der Komplexität der Prozesse und ihrer Sensibilität auf Veränderungen in der Umwelt.		

OcCC (2003): Extremereignisse und Klimaänderung [45]

Referenz	OcCC (Hrsg.) (2003): Extremereignisse und Klimaänderung. OcCC Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Bern. 88 S.		
Zusammenfassung	Die Studie fasst den Wissensstand zum Zeitpunkt der Erarbeitung der Studie im Jahr 2003 über den Zusammenhang zwischen globaler Klimaänderung und Extremereignissen in der Schweiz zusammen. In einem ersten Teil des Berichts werden wissenschaftliche Grundlagen aufgeführt. Der zweite Teil gibt eine Übersicht über den damaligen Wissensstand zu den für die Schweiz wichtigsten Kategorien von Extremereignissen: Temperaturextreme, Frost, Trockenheit, Waldbrand, Starkniederschläge, Hagel, Hochwasser, Massenbewegungen, Lawinen und Winterstürme. Wo möglich und sinnvoll werden Aussagen zu Sensitivitäten der Prozesse und zu den erwarteten Veränderungen gegeben.		
Szenarien	IPCC 2001 [6]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
Raum	Es werden allgemeine Aussagen auf nationaler Ebene gemacht, die keine weitere Differenzierung zulassen.		
Prozess	U.a. werden die Extremereignis-Kategorien Hochwasser, Massenbewegungen (Rutschungen, Fels- und Bergstürze) und Lawinen betrachtet. Insbesondere die Aussagen zu den Massenbewegungen sind wenig differenziert.		
Massnahmen	Das OcCC gibt generelle Empfehlungen ab für die Umsetzung von Massnahmen zum Schutz vor Naturgefahren im Hinblick auf den Klimawandel. Besonders hervorgehoben wird die Bedeutung raumplanerischer Massnahmen und des Monitorings.		
Fazit	Grundzüge der zu erwarteten Veränderung der Naturgefahrenprozesse im Zuge des Klimawandels werden aufgezeigt. Die 2003 vorhandene Wissensgrundlage macht aber nur pauschale Aussagen möglich, so dass sich die Studie nur bedingt als Grundlage für neue Strategien eignet. Die aufgezeigten Grundzüge der Prozesse und insbesondere die allgemein gehaltenen Empfehlungen für die Massnahmenplanung sind aber auch heute noch gültig.		
Beurteilung der Relevanz	Umfassende, anschauliche und verständliche Dokumentation mit Beispielen und Erklärungen, jedoch weniger aktuell als [17].		
Besonderheiten	Bereits die zum Zeitpunkt der Studie (2003) vorhandene Wissensgrundlage zum Klimawandel und Extremereignissen wurde als ausreichend bewertet für die Ergreifung von Massnahmen gegen den Klimawandel und zum Schutz vor Extremereignissen. Obwohl die damaligen Grundlagen weniger detaillierte Prognosen und nur pauschale Vermutungen zur Entwicklung der Naturgefahrenprozesse ermöglichten, sind die vom OcCC abgegebenen, allgemeinen Empfehlungen zur Massnahmenplanung auch heute noch aktuell. Für Schadenausmass und Schadenhäufigkeit in der Schweiz sind menschliche Faktoren wie Nutzungsänderungen und Wirtschaftswachstum bedeutender als der vergleichsweise langsame Prozess der Klimaänderung.		



OcCC und ProClim (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050 (CH2007) [46]

Referenz	OcCC und ProClim (Hrsg.) (2007). Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung und ProClim Forum für Klima und Global Change, Bern. 168 S.		
Zusammenfassung	Die bis zum Jahr 2050 aufgrund der Klimaänderung mögliche Folgen und Verletzlichkeiten von Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft in der Schweiz werden beschrieben. Für verschiedene Themenbereiche, darunter Extremereignisse allgemein und Naturgefahr Wasser werden die erwarteten Entwicklungen wie auch deren Wichtigkeit für Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft sowie mögliche Massnahmen und Anpassungsstrategien diskutiert [46]		
Szenarien	IPCC 2001, 2007 [6]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
	<p>Fazit: <u>Konzepte / Strategie</u></p> <p>Planung</p> <p>Relevanz: </p>		
Raum	Die gesamte Schweiz wird betrachtet. Bei den Prognosen bezüglich Hochwasserentwicklung werden grosse Einzugsgebiete des Juras, des Mittellandes, der Voralpen und des Tessins, kleine Einzugsgebiete des Mittellandes und der Alpen sowie das Hochgebirge unterschieden.		
Prozess	Eingegangen wird v.a. auf die mögliche Entwicklung von Hochwassern. Sturz-, Rutsch- und Lawinengefahren werden nur am Rande erwähnt.		
Massnahmen	Allgemeine, qualitative Empfehlungen für die Massnahmenplanung werden abgegeben.		
Fazit	Im Bericht werden die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Bereiche Gesellschaft, Wirtschaft und Ökologie sehr umfassend betrachtet. Die Prognosen in Bezug auf Naturgefahrenprozesse sind dabei nur ein sehr kleiner Teil und demnach nicht so vertieft bearbeitet als dass sich daraus Aussagen für konkrete Planungszwecke ableiten lassen. Wohl aber sollte die Studie für die Ausarbeitung nationaler Strategien im Umgang mit dem Klimawandel betrachtet werden. Denn hierfür ist eine Gesamtsicht des Klimasystems wichtig und gemäss den Autoren (2007:4) dient der Bericht "als Grundlage für die zukünftige wünschenswerte und nötige Ausrichtung [...], um die von der Schweiz zu ergreifenden Massnahmen und die Gestaltung des politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Handelns zu planen." [46]		
Beurteilung der Relevanz	In Bezug auf die klimatischen Prognosen und die Prozessvorhersage liegen heute aktuellere und differenziertere Grundlagen vor. Die vorgestellten Grundprinzipien bei der Planung von Schutzmassnahmen im Hinblick auf den Klimawandel sind aber auch heute noch aktuell und von Bedeutung.		
Besonderheiten	Obwohl heute differenziertere Prognosen möglich sind über die sich im Zuge des Klimawandels ändernden Naturgefahrenprozesse als 2007, haben die in dem Bericht abgegebenen allgemeinen und qualitativen Empfehlungen für die Massnahmenplanung auch heute noch Gültigkeit.		

Ragettli et al. (2020): Climate change impacts on summer flood frequencies [51]

Referenz	Ragettli S., Tong X., Zhang G., Wand H., Zhang P. und Stähli M. (2020): Climate change impacts on summer flood frequencies in two mountainous catchments in China and Switzerland. In: Hydrology Research.		
Zusammenfassung	Mit Hilfe eines hydrologischen Modells in Kombination mit stochastisch generierten Niederschlagsdaten werden auf Basis der neusten verfügbaren Klimaszenarien CH2018 die erwarteten Veränderungen der sommerlichen Hochwasserregime in zwei gebirgigen Einzugsgebieten in der Schweiz und in China untersucht und verglichen.		
Szenarien	CH2018 [4]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
Raum	Das in der Schweiz untersuchte Einzugsgebiet ist das Alptal (SZ).		
Prozess	Sommerliche Hochwasserereignisse in den Monaten Mai – Oktober werden untersucht (ohne Einbezug von Schnee) und quantitative Angaben zu den erwarteten Veränderungen bis ins Jahr 2050 gemacht.		
Massnahmen	Es wird darauf hingewiesen, dass Massnahmen zum Schutz vor künftigen Hochwasserereignissen normalerweise ohne Einbezug des Einflusses des Klimawandels geplant werden. Dies wird als nicht sicher beurteilt, da Klimaprognosen substantielle Zunahmen der Niederschläge und Hochwasserereignisse vorhersagen. Ragettli et al. [51] plädieren dafür, dass mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf Extreme bei der Planung von Hochwasserschutzmassnahmen berücksichtigt werden. Weitere Angaben zur Massnahmenplanung werden keine gemacht.		
Fazit	Die Studie fokussiert auf einen lokalen Raum und einen Unterprozess dynamischer Überschwemmungen, was den Nutzen für die Ausarbeitung genereller Strategien einschränkt. Nichtsdestotrotz ist die allgemeine Tendenz der sommerlichen Hochwasserereignisse bei der Ausarbeitung von Strategien zu berücksichtigen. Quantitative Angaben zu den erwarteten Veränderungen in Magnitude und Frequenz der sommerlichen Hochwasserereignisse können wichtige Hinweise liefern bei konkreten Planungsaufgaben. Konkrete Grundlagen werden aber keine gegeben.		
Beurteilung der Relevanz	Bedeutender als die inhaltlichen Resultate der Studie sind der präsentierte Mehrwert und die aufgezeigten Chancen, die sich durch Einbezug der neusten vorhandenen Klimagrundlagen mit einer räumlich und zeitlich differenzierteren Auflösung der Niederschlagsdaten ergeben.		
Besonderheiten	<p>Es handelt sich um die einzige im vorliegenden Bericht untersuchte Studie auf Basis von CH2018 und mit stündlich aufgelösten Inputdaten. Durch Verwendung kleinräumiger und stündlich aufgelöster Niederschlagsdaten können Prognosen zu sommerliche Hochwasserereignisse gemacht werden, die meist von kurz andauernden und lokal auftretenden konvektiven Niederschlägen ausgelöst werden.</p> <p>Historische Ereignisse und Beobachtungen sind keine verlässliche Basis für künftige Prognosen, da die Zeitreihen meist kürzer sind als die Wiederkehrperiode der extremen Ereignisse und das Klima nicht als stationär betrachtet werden darf.</p> <p>Mit Hilfe von stochastisch generierten Klimadaten können kurze Beobachtungsreihen verlängert und verlässliche Prognosen erreicht werden.</p>		

Stoffel et al. (2014): Climate change impacts on mass movements [53]

Referenz	Stoffel M., Tiranti D. und Huggel C. (2014): Climate change impacts on mass movements – Case studies from the European Alps. In: Science of The Total Environment, Volume 493, S. 1255 – 1266.		
Zusammenfassung	Die Studie fasst das aktuelle Wissen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Massenbewegungsaktivität in Berggebieten zusammen und veranschaulicht sie anhand von charakteristischen Beispielen von Murgang-, Felssturz- und Rutschereignissen aus den französischen, italienischen und schweizerischen Alpen.		
Szenarien	IPCC 2013 [6] und Gobiet et al. 2014 [33]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
	<p>Fazit: } Konzepte / Strategie</p> <p>Planung</p> <p>Relevanz: </p>		
Raum	Mögliche Veränderungen der Naturgefahrenprozesse werden in jeweils ausgewählten Regionen überprüft und veranschaulicht. Untersuchungsräume sind für den Prozess Murgang das Mattertal, für Felsstürze die Schweizer Zentralalpen und für Rutschungen die französischen Alpen und das Piemont (Italien). Die Ergebnisse gelten für die jeweiligen Untersuchungsregionen. Es werden ebenfalls einige allgemeine, national geltende Erkenntnisse beschrieben.		
Prozess	Fokus liegt auf den Prozessen periglazialer Murgang und Felssturz. Wobei die inhaltlichen Erkenntnisse in Bezug auf Sturzereignisse weit weniger aussagekräftig sind als zu Murgängen. Rutschereignisse werden in den französischen und westitalienischen Alpen untersucht. Die regionalen Forschungsergebnisse können nicht direkt auf die Schweiz übertragen werden.		
Massnahmen	Massnahmen werden keine angesprochen.		
Fazit	Die im Bericht enthaltenen allgemeinen Prognosen, wie sich die Aktivität von Massenbewegungen im Hochgebirge verändern wird, sind sowohl bei der Entwicklung von Strategien als auch bei konkreten Massnahmenplanungen zu berücksichtigen. Zentraler Punkt der Studie ist die Veranschaulichung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Prozesse an regionalen Beispielen aus verschiedenen Bergregionen. Die regional gemachten Erkenntnisse können weder verallgemeinert werden, noch sind sie als konkrete Planungsgrundlage nutzbar.		
Beurteilung der Relevanz	Die Veranschaulichung der Auswirkungen des Klimawandels an regionalen Beispielen unterstützt das Prozessverständnis. Da viele Erkenntnisse aber nur für die spezifischen Untersuchungsregionen gelten, ist die Relevanz der Studie für die Erarbeitung neuer nationaler Strategien beschränkt.		
Besonderheiten	<p>Ein theoretisches Verständnis des Zusammenhangs zwischen Massenbewegungen im Hochgebirge und dem Klimawandel besteht, kann anhand der Beobachtungen aber noch nicht statistisch bestätigt werden.</p> <p>Die Kenntnisse des Zusammenhangs der Prozesse mit dem Klimawandel sind bei Murgängen deutlich grösser als bei Felsstürzen. Die Forschung zu Rutschereignissen ist recht spärlich. Bei Murgangereignissen muss mit möglichen Prozesskoppelungen gerechnet werden.</p>		

4.3 Studien mit geringer Relevanz

Die im Folgenden aufgeführten Studien sind als Grundlage für die Ausarbeitung einer Strategie zum künftigen Umgang mit Naturgefahrenprozessen oder die Massnahmenplanung weniger relevant.

Einhorn et al. (2015): Climate change and Natural Hazards in the Alps [26]

Referenz	Einhorn B. et al. (2015): Climate change and Natural Hazards in the Alps: Observed and potential impacts on physical and socio-economic systems. In: Journal of Alpine Research, Volume 103-2.		
Zusammenfassung	Der Synthesebericht gibt einen Überblick über die zwischen 2007 – 2013 erlangten Forschungsergebnisse in Bezug auf Klimawandel und Naturgefahren im europäischen Alpenraum. Verschiedene Projekte, Wissens- und Datenplattformen werden vorgestellt und verlinkt. Wahrgenommene, beobachtete und prognostizierte Veränderungen der Klimaindikatoren (i), des Naturraums in Kryosphäre, hydrologischen Kreisläufen und geomorphologischen Prozessen (ii) sowie der Naturgefahrenprozesse in den französischen Alpen (iii) werden präsentiert.		
Szenarien	IPCC 2013/2014 [6], EURO-CORDEX und ENSEMBLES-Projektionen		
Einordnung			
Raum	Einige allgemeine Erkenntnisse für den Alpenraum sind auch in den Schweizer Alpen von Bedeutung. Der Fokus der Studie liegt jedoch auf den französischen Alpen. Die hier erlangten Resultate dürfen nicht direkt auf die Schweizer Alpen übertragen werden.		
Prozess	Abgesehen von Sturzereignissen werden alle im Alpenraum auftretenden gravitativen Naturgefahrenprozesse angesprochen.		
Massnahmen	Auf konkrete Massnahmen wird nicht eingegangen.		
Fazit	Allgemeine in der Studie vorgestellte Prognosen zur Entwicklung der Naturgefahrenprozesse im Zuge des Klimawandels gelten auch in den Schweizer Alpen. Die Kenntnis dieser allgemeinen Trends ist Voraussetzung für die Erarbeitung nationaler Strategien. Die Aussagen sind aber sehr allgemein gehalten und die Erkenntnisse nur teilweise auf die Schweizer Alpen übertragbar. Ein Nutzen für die konkrete Massnahmenplanung ist daher nicht gegeben.		
Beurteilung der Relevanz	Da der Fokus des Syntheseberichts auf den französischen Alpen liegt, ist seine Relevanz für die Schweiz eingeschränkt.		
Besonderheiten	Einhorn et al. stellen die bedeutendsten in und für die europäischen Alpen entwickelten Datenbanken und Wissensplattformen vor und verlinken diese. So gibt die Publikation einen Überblick über die zwischen 2007 – 2013 entwickelten Projekte und Forschungsbemühungen und kann als Ausgangslage für die weitere Informationsbeschaffung dienen. Die Entwicklung der Risiken ist nicht allein von der Entwicklung der Naturgefahrenprozesse abhängig, sondern ebenso stark von der Entwicklung des Schadenpotentials. Daher plädieren Einhorn et al. darauf, dass bei der Ausarbeitung von Anpassungsmassnahmen neben den Naturwissenschaften ebenfalls die Human- und Sozialwissenschaften einbezogen werden und die verschiedenen Disziplinen stärker miteinander vernetzt werden und zusammenarbeiten.		

Horton et al. (2006): Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty [35]

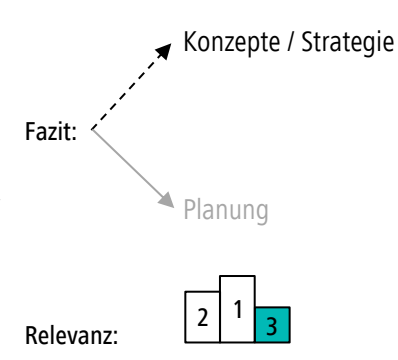
Referenz	Horton P., Schläfli B., Mezghani A., Hingray B. und Musy A. (2006): Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty. In: Hydrol. Process. Vol. 20, S. 2091 – 2109.		
Zusammenfassung	Die durch den Klimawandel hervorgerufenen, bis Ende des 21. Jahrhunderts erwarteten Veränderungen in den Abflussregimes der hydrologischen Einzugsgebiete der Schweizer Alpen werden aufgezeigt. Neben den allgemeinen inhaltlichen Resultaten werden die Unsicherheiten bei der Prognose mittels regionaler Klimamodelle besprochen.		
Szenarien	IPCC 2001 (indirekt) [6]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
			<p>Fazit: </p> <p>Relevanz: </p>
Raum	11 hydrologische Einzugsgebiete in den Schweizer Alpen werden untersucht. Diese wurden gemäss Autoren so ausgewählt, dass sie die sieben verschiedenen hydroklimatischen Zonen der Schweizer Alpen und die in diesen Zonen auftretenden, unterschiedlichen gebirgshydrologischen Regime repräsentieren. Dies ermöglicht allgemeine Schlüsse für den alpinen Raum.		
Prozess	Es wird die Abflussänderung und die erwarteten Veränderungen der Abflussregime besprochen. Daraus können allgemeine Rückschlüsse auf Hochwasserwahrscheinlichkeiten zu verschiedenen Jahreszeiten gemacht werden. Der Gefahrenprozess Wasser an sich wird aber nicht besprochen.		
Massnahmen	Massnahmen werden nicht besprochen. Die thematisierten Änderungen der Abflussregime ermöglichen allgemeine Aussagen für ein künftiges, nachhaltiges Wassermanagement.		
Fazit	Mit dem Blick auf die Veränderung gesamter Abflussregime werden Zusammenhänge besser verstanden, als bei der Fokussierung einzelner (Extrem)Werte. Nachhaltiges Wassermanagement sollte auf solchen gesamtheitlichen Betrachtungen aufbauen.		
Beurteilung der Relevanz	Die vorgestellten Resultate sind ähnlich, aber weniger aktuell als diejenigen der Studien [25] und [39].		
Besonderheiten	Es wird aufgezeigt, dass sowohl die verwendeten regionalen Klimamodelle als auch die als Basis dienenden globalen Klimaszenarien grossen Einfluss auf die Resultate haben. Quantitative Bewertungen von hydrologischen Veränderungen, die nur auf einer kleinen Anzahl regionaler Klimaänderungsszenarien basieren, können zu irreführenden Ergebnissen führen. Unsicherheiten aufgrund des verwendeten Klimaszenarios sind bei einer gegebenen Modellstruktur für die Resultate von grösserer Bedeutung als die Wahl der Modelparameter.		

Messenzehl et al. (2017): Regional-scale controls on spatial activity of rockfalls [42]

Referenz	Messenzehl K., Meyer H., Otto J. C., Hoffmann T. und Dikau, R. (2017): Regional-scale controls on the spatial activity of rockfalls (Turtmann valley, Swiss Alps) – a multivariate modeling approach. In: Geomorphology, Volume 287, S. 29 – 45.		
Zusammenfassung	In der Studie wird ein Ansatz vorgestellt um die wichtigsten Einflussfaktoren von Sturzprozessen auf regionaler Ebene zu identifizieren und deren Bedeutung zu quantifizieren. Neben den inhaltlichen Erkenntnissen, die das komplexe Zusammenspiel zwischen felsmechanischen, paraglazialen und topoklimatischen Einflussfaktoren von Sturzereignissen verdeutlichen, wird das methodische Vorgehen kombinierter statistischer Ansätze beschrieben und bewertet.		
Szenarien	Nogués-Bravo et al. 2007 [9], IPCC 2007 (indirekt) [6]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
	<p>Fazit: Konzepte / Strategie Planung</p> <p>Relevanz: </p>		
Raum	Untersucht werden 220 Sturzschutthalden in von Permafrost betroffenen Gebieten im Turtmannal (VS).		
Prozess	Fokus liegt auf dem Verständnis von Sturzprozessen auf regionaler Ebene. Verschiedene die Sturzprozesse beeinflussende Faktoren werden untersucht und gewichtet.		
Massnahmen	Schutzmassnahmen werden keine angesprochen.		
Fazit	Der Zusammenhang zwischen periglaziale Faktoren und Sturzprozessen wird als zentral bewertet. Der direkte Einfluss des Klimawandels auf Sturzprozesse wird nicht vertieft untersucht bzw. es wird aufgezeigt, dass klimatische Bedingungen alleine nicht der Grund für erhöhte Sturzaktivität sein können, sondern viele verschiedene Faktoren betrachtet werden müssen. Auch auf Schutzmassnahmen wird nicht eingegangen. So trägt die Studie zwar zum besseren Verständnis von Sturzprozessen bei, ist für die konkrete Planung von Schutzmassnahmen oder die Erarbeitung einer allgemeinen Strategie im Hinblick auf den Klimawandel aber wenig hilfreich.		
Beurteilung der Relevanz	Es wird untersucht wie und wie stark verschiedene Faktoren die Sturzprozesse beeinflussen, nicht wie sich die Prozesse selbst verändern. Klimawandel wird nur am Rande, Schutzmassnahmen werden gar nicht angesprochen. Die Studie ist daher für die Erarbeitung einer nationalen Strategie zum künftigen Umgang mit Naturgefahren oder für konkrete Planungszwecke wenig relevant.		
Besonderheiten	Sturzprozesse sind komplex, nichtlinear und durch viele verschiedene Faktoren beeinflusst, die auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen wirken. Bei der Erforschung des Prozesses ist daher die Bewertung der Multikollinearität der Daten zentral. Weiter muss bei der Bewertung des Zusammenhangs zwischen Klimawandel, Permafrostdegradation und Sturzereignissen die zeitliche Skala berücksichtigt werden, da Sturzereignisse meist eine verzögerte Reaktion auf paraglaziale Prozesse sind.		

MeteoSchweiz und PLANAT (2007): Klimaänderung und Naturkatastrophen in der Schweiz [43]

Referenz	MeteoSchweiz und PLANAT (Hrsg.) (2007): Klimaänderung und Naturkatastrophen in der Schweiz. MeteoSchweiz Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie und PLANAT Nationale Plattform Naturgefahren, 4 S.		
Zusammenfassung	Informationsbroschüre für die breite Bevölkerung über die Entwicklung des Klimas und damit zusammenhängend der Naturkatastrophen in der Schweiz in der Vergangenheit bis heute und in Zukunft. Weiter wird knapp und ganz allgemein die Empfindlichkeit der Gesellschaft gegenüber Naturkatastrophen beschrieben und die Dringlichkeit von anpassungsfähigen Massnahmen aufgezeigt.		
Szenarien	IPCC 2007 [6]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
Raum	Naturgefahrenprozesse werden mit Fokus auf den Alpenraum betrachtet. Allgemeine Aussagen zum Klima werden zur gesamten Schweiz gemacht. Bei den Prognosen werden Nord- und Südschweiz unterschieden.		
Prozess	Es wird erwartet, dass die Gefahr von Hochwassern, Murgängen und Hangrutschungen zunimmt. Differenzierte Aussagen zu den Naturgefahrenprozessen werden keine gemacht.		
Massnahmen	Allgemeine Grundsätze für die Massnahmenplanung werden gegeben (wie Flexibilität und Anpassungsfähigkeit) und darauf hingewiesen, dass nicht nur Naturgefahrenprozesse per se, sondern auch die Entwicklung des Schadenpotentials betrachtet werden muss.		
Fazit	Wenig vertieft werden allgemeine Grundsätze für die Massnahmenplanung aufgeführt.		
Beurteilung der Relevanz	Es handelt sich bei der betrachteten Studie um eine Informationsbroschüre für die breite Bevölkerung. Die Darstellung der Inhalte und Zusammenhänge ist demnach anschaulich aber wenig vertieft und bringt für Fachleute im Vergleich zu anderen Dokumentationen (z.B. [13], [45], [46] und [17]) keine neuen Erkenntnisse.		
Besonderheiten	Informationsquelle für die breite Bevölkerung: Knapp, anschaulich und leicht verständlich wird aufgezeigt, wie und aus welchem Grund in Zukunft anpassungsfähige Schutzmassnahmen und eine vorausschauende Raumplanung verlangt sind.		



OECD (2007): Climate Change in the European Alps [47]

Referenz	OECD (Hrsg.) (2007): Climate Change in the European Alps - adapting winter tourism and natural hazards management. OECD Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung.		
Zusammenfassung	Es werden die Auswirkungen und die Adaptationsstrategien in den beiden Bereichen Wintertourismus und Naturgefahren in den Europäischen Alpen untersucht. Neben den zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Naturgefahrenprozesse werden insbesondere auch die Anpassungsstrategien der Schweiz, Frankreich und Österreich beschrieben und miteinander verglichen. Anschliessend werden einige Beispiele gegeben, bei welchen der Klimawandel in die konkrete Massnahmenplanung einbezogen wurde.		
Szenarien	IPCC 2001 [6]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
Raum	<p>Fazit: Konzepte / Strategie</p> <p>Planung</p> <p>Relevanz: 2 1 3</p> <p>Es werden der Klimawandel und die Naturgefahrenprozesse im gesamten Europäischen Alpenraum in der Schweiz, Österreich, Frankreich, Deutschland und Italien untersucht. Die Analyse deckt innerhalb der Schweiz nur den Alpenraum ab. Die gemachten Aussagen sind so allgemein, dass sie keine weitere Differenzierung von Regionen zulassen.</p>		
Prozess	<p>Ein kurzer, allgemeiner Überblick über die Mechanismen und zu erwartenden Veränderungen der Prozesse Hochwasser, Lawinen und Massenbewegungen (Rutsch- und Sturzprozesse) wird gegeben, ohne vertiefte Analyse dieser Prozesse.</p>		
Massnahmen	<p>Ganz allgemeine Grundsätze werden aufgezeigt, auf was bei der Planung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren geachtet werden muss. Es sind dies vor allem Flexibilität und Voraussicht. Besondere Bedeutung wird in Zukunft dem aktiven Monitoring zugesprochen. Neben den direkten Schutzmassnahmen werden Einblicke in politische und wirtschaftliche Anpassungsstrategien gegeben.</p>		
Fazit	<p>Angaben zur konkreten Ausarbeitung oder allenfalls Bemessung von Massnahmen werden keine gegeben. Es wird im Gegenteil sogar aufgezeigt, dass quantitative Planungsangaben und starre Bemessungen von Schutzbauten in Anbetracht des Klimawandels nicht sinnvoll sind. Die aufgeführten allgemeinen Grundsätze für die Ausarbeitung von Massnahmen zum Schutz vor Naturgefahren sind auch heute noch aktuell und sollten bei jeder Massnahmenplanung beachtet werden. Ein Vergleich der Strategien im Umgang mit Naturgefahren in Frankreich, Österreich und der Schweiz zeigt die jeweiligen Vorteile sowie die Grenzen und Schwierigkeiten auf.</p>		
Beurteilung der Relevanz	<p>Die im Bericht enthaltenen Erkenntnisse und Aussagen sind ähnlich wie in der Studie [46]. Da der Fokus der Studie [46] auf der Schweiz liegt und nicht wie im vorliegenden Bericht auf dem gesamten europäischen Alpenraum, wird die Relevanz von [46] höher eingestuft als des hier besprochenen Berichts [47].</p>		
Besonderheiten	<p>Die vorliegende breite Betrachtung des Klimawandels, seinen Auswirkungen auf die Naturgefahrenprozesse in den Alpen und die möglichen Anpassungsmassnahmen zeigt, dass neben den direkten Schutzmassnahmen ebenfalls politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen sowie die Kommunikation von sehr grosser Bedeutung sind. Ausserdem wird deutlich, dass der Klimawandel nur einer von vielen Gründen ist, welcher die Gefährdungssituation beeinflusst.</p>		

Perroud und Bader (2013): Klimaänderung in der Schweiz [48]

Referenz	Perroud M. und Bader S. (2013): Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zur Ursache, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 1308. BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern und MeteoSchweiz Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Zürich. 86 S.		
Zusammenfassung	Eine Übersicht über die Klimaentwicklung sowie deren Auswirkungen auf die Kryosphäre, die Hydrosphäre, die Vegetation, die Gesundheit, die Wirtschaft und die Gesellschaft wird präsentiert. Unmittelbare und langfristige Auswirkungen der Klimaänderung in verschiedenen Bereichen der natürlichen und anthropogen beeinflussten Umwelt werden betrachtet und Hinweise auf mögliche Anpassungsmassnahmen gegeben.		
Szenarien	CH2011 [3], CH2007 [46], IPCC 2001, 2007 [6]		
Einordnung			
Raum	Es werden die Entwicklungen in der gesamten Schweiz betrachtet.		
Prozess	Naturgefahren werden nicht explizit untersucht, sondern nur am Rande als einer von vielen durch den Klimawandel beeinflussten Bereiche betrachtet. Aus der Betrachtung der Abflussänderungen können Schlüsse auf die Entwicklung des Naturgefahrenprozesses Wasser gezogen werden.		
Massnahmen	Allgemeine Massnahmen zur Anpassung an den Klimawandel werden präsentiert, darunter auch Massnahmen zur Anpassung an extreme Naturereignisse. Die vorgestellten Grundsätze sind sehr pauschal formuliert und präsentieren einzelne Aspekte des integralen Risikomanagements, aber keine neuen Erkenntnisse.		
Fazit	Die dargestellten Anzeichen für die Klimaänderung in der Schweiz sollen gemäss den Autoren als Entscheidungsgrundlage für die Evaluation von Anpassungsmassnahmen und ihrer Erfolgskontrolle dienen. Konkrete Empfehlungen für den Umgang mit Naturgefahren vor dem Hintergrund des Klimawandels werden keine gegeben. Die sehr breite Betrachtung der Anzeichen der Klimaänderung in verschiedensten Bereichen unserer Umwelt macht deutlich, dass kein Prozess separat betrachtet werden darf, sondern immer das Gesamtgefüge im Blick behalten werden muss.		
Beurteilung der Relevanz	Da Naturgefahren nicht explizit und Massnahmen nur sehr pauschal dargestellt werden, ist die Relevanz der Studie für das Thema "Naturgefahren und Klimawandel" gering.		
Besonderheiten	Für die Evaluation der Massnahmen zur Anpassung an den Klimawandel liegen gemäss den Autoren zwar Studien vor, aber bislang kein systematisches Überwachungssystem. Dieses sei jedoch sowohl für die Beurteilung der Massnahmen, als auch für die Überprüfung ihrer Ergebnisse und für die Vorbeugung unerwünschter Entwicklungen unverzichtbar.		

Pielmeier et al. (2013): Wet snow avalanche activity in the Swiss Alps [49]

Referenz	Pielmeier C., Techel F., Marty C. und Stucki T. (2013): Wet snow avalanche activity in the Swiss Alps – trend analysis for mid-winter season. In: Proceedings of the International Snow Science Workshop, Grenoble and Chamonix, S. 1240 – 1246.		
Zusammenfassung	Die Studie quantifiziert mit Hilfe einer robusten Zeitreihenanalyse Korrelationen und Trends der Lawinenaktivität in der Schweiz. Auf Basis von Langzeitbeobachtungen (1952 – 2013) wird aufgezeigt, dass in den Wintermonaten ein signifikanter, positiver Trend in Anzahl und Anteil von Nassschnee- und tiefen Gleitschneelawinen besteht, der sich mit dem Temperaturtrend in der Schweiz deckt. Es wird prognostiziert, dass sich diese positiven Trends auch in Zukunft weiter fortsetzen werden.		
Szenarien	Gobiet et al (2014) [33]		
Einordnung	<p>Raum</p>	<p>Prozess</p>	<p>Massnahmen</p>
			<p>Fazit: </p> <p>Relevanz: </p>
Raum	Es werden alle in der Schweiz aufgetretenen Lawinen untersucht und allgemeine, landesweit gültige Prognosen formuliert.		
Prozess	Der Fokus der Untersuchung liegt auf Nassschnee- und tiefen Gleitschneelawinen die während den Monaten Dezember bis Februar stattfinden.		
Massnahmen	Es wird darauf hingewiesen, dass der anhaltende positive Trend der Nassschneelawinenaktivität eine Anpassung im Risikomanagement erfordert. Insbesondere wird die Bedeutung von Monitoring und einem besseren hervorgehoben. Konkretere Angaben werden aber keine gemacht.		
Fazit	Wesentliche inhaltliche Erkenntnis der Studie ist, dass der Anteil und die Häufigkeit von Nassschneelawinen in den Wintermonaten in Zukunft zunehmen wird. Diesem Umstand muss sowohl bei der Massnahmenplanung als auch bei der Erarbeitung allgemeiner Strategien Rechnung getragen werden.		
Beurteilung der Relevanz	Die inhaltliche Erkenntnis der Studie, dass in Zukunft in den Wintermonaten eine erhöhte Nassschneelawinenaktivität zu erwarten ist, ist von Bedeutung. Die detaillierten Inhalte des Berichts sind aber weder für konkrete Planungszwecke noch Strategieüberlegungen nötig.		
Besonderheiten	Das SLF führt eine Lawinendatenbank, in welcher insbesondere Schadenlawinen dokumentiert sind. [68] Es werden insbesondere diejenigen Ereignisse aufgeführt, die eine ökonomische Relevanz für den Menschen haben. Es wird darauf hingewiesen, dass die Lawinenprognose auch in Zukunft schwierig bleiben wird, da sie stark abhängig ist von präzisen lokalen Informationen und kurzfristigen meteorologischen Vorhersagen.		

5 Stand des Wissens – Synthese der untersuchten Literatur

Im Folgenden wird eine Übersicht gegeben über die in den untersuchten Studien behandelten Themen. Es handelt sich um eine Zusammenfassung der in Kapitel 4 in einzelnen Steckbriefen präsentierten Inhalte.

5.1 Übersicht über alle untersuchten Studien

Eine Überlagerung der in den Steckbriefen präsentierte Einordnung in die Analysedimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp ist in Abbildung 7 dargestellt.

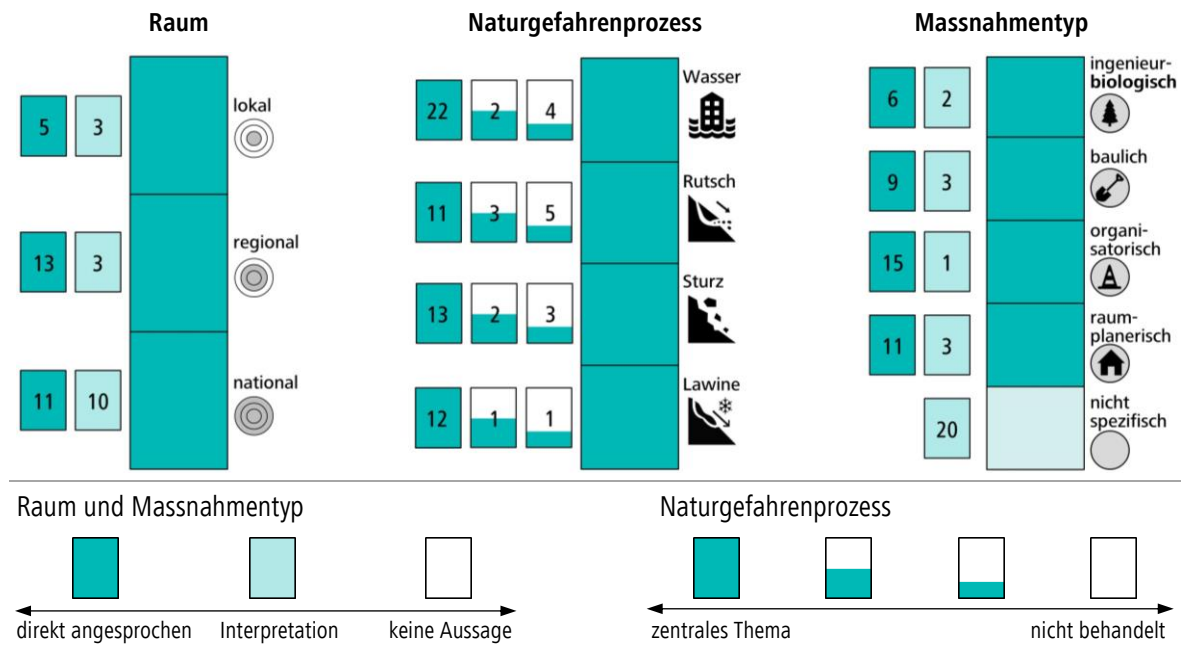


Abbildung 7: Überlagerung der drei Analysedimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp aus allen Steckbriefen (total 31 Studien).

Links neben den Analysedimensionen sind detailliertere quantitative Angaben zur Erhebung der einzelnen Elemente aufgeführt (z.B. wird der lokale Raum in 5 Studien direkt angesprochen, in 3 Studien sind Aussagen auf den lokalen Raum übertragbar (Interpretation)).

Es wird deutlich, dass eine pauschale Überlagerung aller zu den einzelnen Studien gehörenden Graphiken zu einem undifferenzierten Bild führt (Abbildung 7). Alle Elemente sind ausgefüllt – d.h. es ist jedes Element durch mind. eine Studie abgedeckt. Auch quantitative Angaben darüber wie viele Studien das jeweilige Element (z.B. den Naturgefahrprozess Lawine) behandeln, liefern noch kein differenziertes Bild. Im Folgenden werden die drei Dimensionen einzeln besprochen und das in Abbildung 7 präsentierte Gesamtbild etwas differenzierter betrachtet und analysiert. In einer Art Zusammenfassung werden die präsentierten Inhalte schliesslich vereinfacht dargestellt.

Als Fazit der folgenden Unterkapitel wird jeweils angegeben, welche Inhalte vorhanden sind (Bestehendes) und welche Lücken identifiziert wurden.



5.1.1 Raum

Aus Abbildung 7 ist ersichtlich, dass hauptsächlich nationale und regionale Studien untersucht wurden und nur vereinzelte lokale Analysen in diesen Bericht einfliessen. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Klimawandel und Naturgefahren im lokalen Kontext, evtl. sogar ohne öffentlich zugängliche Publikation der Ergebnisse (wie das Beispiel des technischen Berichts zur Gefahrenbeurteilung des Fellbachs [31]) schwieriger aufzufinden sind als grossangelegte nationale Studien, die evtl. sogar beworben und in den Medien diskutiert und besprochen werden (z.B. [17]). Dementsprechend zufällig ist die Auswahl der in diesem Bericht betrachteten lokalen Studien. Bei den nationalen Studien hingegen kann davon ausgegangen werden, dass die wichtigsten Referenzen erfasst wurden (Abbildung 8 Mitte).

Der Schwerpunkt der Untersuchungen zum Klimawandel und Naturgefahren findet im Alpenraum statt. Dies ist aus verschiedener Hinsicht unmittelbar einleuchtend: Einerseits hat hier ein Grossteil der Naturgefahrenprozesse seinen Ursprung, andererseits ist der Klimawandel in den Alpen deutlicher zu spüren als in anderen Regionen. [17] Da die Alpen in der Schweiz als besonders sensibles System gelten, dürften die Auswirkungen des Klimawandels hier ausgeprägter sein als in anderen Regionen. [22] Über ganz Europa gesehen wird der Klimawandel v.a. in den Gebirgsketten und Küstenregionen sichtbar, da hier Temperatur und Niederschlagsgeschehen sowie deren Entwicklung Ökosysteme, hydrologische Regime und stattfindende Prozesse (z.B. Erosionsprozesse) stark beeinflussen. (z.B. [50])

Weiter stehen in den Alpen einige der weltweit längsten Beobachtungsreihen von Klimaparametern und ein vergleichsweise dichtes Beobachtungsnetz zur Verfügung. [33] Dies begünstigt die Forschung in diesem Raum (siehe Kapitel 6.5.2).

Die Raumskala der Untersuchungen korreliert meist mit dem Detaillierungsgrad der in der jeweiligen Studie gemachten Aussagen und Erkenntnisse. So sind insbesondere in den nationalen und regionalen Studien einige allgemeingültige Aussagen enthalten, auf denen eine nationale Strategie zum Umgang mit Naturgefahren beruhen kann (siehe Kapitel 6). Konkrete Einzelfälle mit Angaben zu spezifischen Planungsgrundlagen sind kaum vorhanden (Abbildung 8 rechts).

Betrachtung der Raumskalen

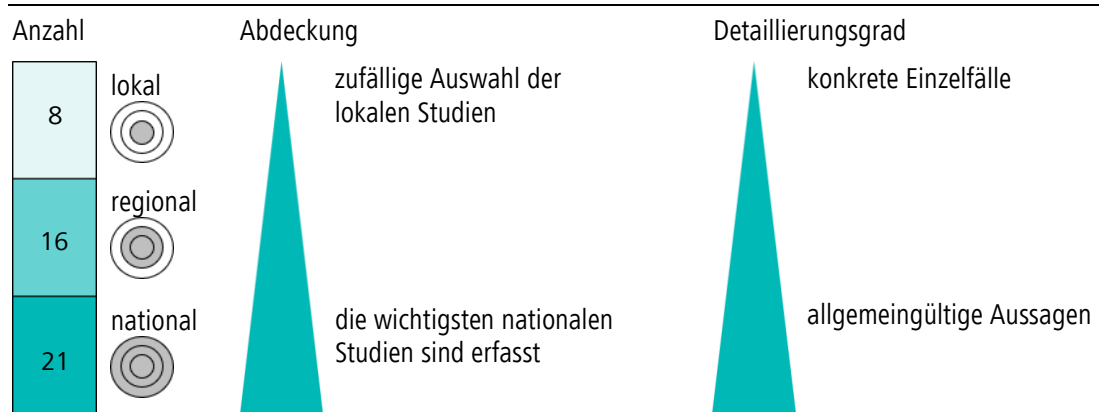


Abbildung 8: Die betrachtete Raumskala korreliert mit der Anzahl betrachteter Studien, der Abdeckung des Raums und dem Detaillierungsgrad der Aussagen.

Fazit Raum



Es wurden hauptsächlich regionale und nationale Studien untersucht. Schwerpunkt der Untersuchungen liegt im Alpenraum.
 → Es sind allgemeingültige, vorwiegend nicht massnahmen-spezifische Aussagen für die Entwicklung einer nationalen Strategie für den Umgang mit Naturgefahren vorhanden.



Wenige lokale Analysen wurden betrachtet.
 → Es sind wenig konkrete Einzelfälle aufgeführt und dementsprechend im vorliegenden Bericht wenige Aussagen zu konkreten Planungen enthalten.

5.1.2 Naturgefahrenprozess

Der Grossteil der untersuchten Studien setzt sich mit dem Prozess Wasser auseinander (Abbildung 7). Doch die jeweilige in den Steckbriefen enthaltene Graphik und somit auch deren Zusammensetzung in Abbildung 7 zeigen nur auf, ob ein Naturgefahrenprozess in einer Studie angesprochen wurde oder nicht. Dies allein gibt noch keine Auskunft über den Informationsgehalt und die Aussagekraft der jeweiligen Erkenntnisse. Hierfür bedarf es einer inhaltlichen Analyse der Studien. Ausgewählte, exemplarische Erkenntnisse und Besonderheiten aus den untersuchten Studien zu den einzelnen Naturgefahrenprozessen sowie sich aus der Summe der Studien ergebende, prozessspezifische Wissenslücken werden im Folgenden aufgeführt.

Wasser

Wasser ist eine bedeutende Ressource der Schweiz. Diesem Umstand tragen viele untersuchte Studien Rechnung (z.B. [17], [22], [25], [35], [39]). Wasser wird häufig ganzheitlich betrachtet – der Naturgefahrenaspekt ist nur ein Teil des Ganzen. Grundlage für ein nachhaltiges Wassermanagement ist nicht nur die Kenntnis über die Extreme, sondern ein Verständnis für das Verhalten des jeweils gesamten Abflussregimes eines Gewässers. Die Grundzüge der zukünftigen hydrologischen Verhältnisse können bereits mit relativ grosser Sicherheit abgeschätzt werden. [17] Aussagen zu extremen Abflüssen (Hoch- und Niedrigwasser) sind dagegen noch unsicherer.

Grosse Unterschiede bestehen bei der Erforschung und Prognose der verschiedenen Wasser-Unterprozesse (Tabelle 2). Statische Überschwemmungen sind in keiner der untersuchten Studien erwähnt und der Prozess Oberflächenabfluss nur in einer einzigen [18]. Obwohl letzterer als bedeutend beurteilt wird für die künftige Gefährdungssituation und sich der Einfluss des Oberflächenabflusses aufgrund der Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung weiter verstärken wird, wurde bisher noch nicht untersucht, wie dieser Prozess durch den Klimawandel beeinflusst wird.

Rutschung

Die Untersuchung und Prognose von spontanen Rutschereignissen bestehen fast ausschliesslich für den periglazialen Raum. Die weitläufige Hypothese, dass die Permafrostdegradation und der deutliche Rückzug der Gletscher die Intensität von flachgründigen Rutschungen erhöhen könnte, wurde in den Alpen vorerst statistisch weder bestätigt noch widerlegt und betrifft nur die Hochlagen. [50]

Der Prozess permanente Rutschung wurde nur in wenigen Studien erwähnt (z.B. [22] [14]) und nur einmal genauer besprochen. [50] Eine detaillierte Analyse des Prozesses fehlt vollständig und die inhaltlichen Erkenntnisse sind dürftig. Es wird einzig darauf hingewiesen, dass jede tiefgründige Rutschung ihre eigenen Merkmale wie Topographie, Hydrogeologie, Vegetation etc. aufweist und hinsichtlich ihrer Reaktion auf den Klimawandel untersucht werden muss. Bei einigen Rutschungen wird eine Intensivierung der Bewegungsrate mit zunehmenden Niederschlägen erwartet. Diese Entwicklung ist aber nicht systematisch und stark von den lokalen Gegebenheiten

abhängig. Reaktivierungen alter Rutschungen sind im Zusammenhang mit dem Klimawandel möglich. [50]

Das Fehlen von Grundlagedaten zu Rutschprozessen führt dazu, dass die Klimasensitivität dieser Prozesse in der Studie [30] nicht untersucht werden konnte. Dieses Beispiel macht deutlich, dass sich Lücken in den Grundlagedaten weiterziehen, da auch keine Folgeuntersuchungen möglich sind (Kapitel 6.5.2).

Sturz

Auftauender Permafrost und der Rückzug der Gletscher wird die Sturzprozesse beeinflussen. Eine Prognose von Magnitude oder Häufigkeit zukünftiger Ereignisse ist aber nicht möglich. [50] Denn Sturzereignisse sind durch sehr viele verschiedene Faktoren auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen beeinflusst. [42] Insbesondere grosse Sturzereignisse wie Felsstürze können meist nicht auf ein einzelnes Ereignis oder einen einzelnen Auslösefaktor zurückgeführt werden, sondern sind Resultat eines lang andauernden Zusammenwirkens verschiedener Faktoren. [37]

Lawine

Zur Beeinflussung der Lawinenabgänge durch den Klimawandel gibt es insbesondere prozessbedingt nur wenig konkrete Aussagen. Denn Lawinensituationen sind das Ergebnis einer stark ausgeprägten Wettersituation (starker Schneefall, erhebliches Tauwetter) in Verbindung mit einer mächtigen Schneedecke. Sie werden daher eher durch sehr kurzfristige Wetterfaktoren (wenige Tage) bedingt, während sich Klimastudien eher mit langfristigen Trends und Durchschnittswerten befassen. [50] Momentan können noch keine Prognosen über die Lawinenaktivität gemacht werden. Denn es bestehen zwar empirische Zusammenhänge zwischen der Lawinenaktivität und dem Klima, aber um fundierte Langzeitprognosen zu erstellen reichen die Kenntnisse nicht aus. [24]

Die Unterscheidung der Lawinenart gemäss Tabelle 2 in Fließlawine, Staublawine und Schneegleiten wurde in den betrachteten Studien nicht wiedergefunden. In Bezug auf den Klimawandel sind allenfalls die differenzierte Betrachtung von Trocken- und Nassschneelawinen sinnvoller. [32]

Fazit Naturgefahrenprozess



Die betrachteten Studien behandeln schwerpunktmässig den Prozess Wasser, wobei dieser ganzheitlich untersucht wird. Veränderungen der Extreme, also des Naturgefahrenprozesses sind nur ein Teilaspekt des ganzen Wandels der Ressource Wasser.



Zur Beeinflussung der Prozesse Sturz, Rutschung und Lawine durch den Klimawandel gibt es insgesamt nur wenig konkrete Angaben. Aussagen zu diesen Prozessen sind bedingt möglich.



Einige Unterprozesse der gravitativen Naturgefahren werden gar nicht oder kaum berücksichtigt. Es sind dies:



- statische Überschwemmungen und Oberflächenabfluss
 - permanente Rutschungen
 - Unterteilung der Lawinenarten
 - Prozessketten
-

5.1.3 Massnahmentyp

Die meisten Studien befassen sich nicht mit spezifischen Massnahmen, wie Abbildung 7 deutlich macht. Wenn Massnahmen direkt angesprochen werden, wird meist auf die Bedeutung des Monitorings und der Raumplanung hingewiesen (siehe Kapitel 6.3.6). Erstere Massnahme ist im Zusammenhang mit dem Klimawandel in einer sich ändernden Umwelt bedeutend, um die unsicheren günstigen und ungünstigen Entwicklungen zu erkennen. Die Raumplanung ist relevant, da zumindest in naher Zukunft die Entwicklung des Schadenpotentials aufgrund der prognostizierten Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung einen grösseren Einfluss auf das Risiko haben kann, als die sich unter dem Einfluss des Klimawandels verändernden Naturgefahrenprozesse (z.B. [18]).

Konkrete quantitative Angaben oder Empfehlungen für die Ausbildung von Schutzmassnahmen fehlen. Für grosse Raumskalen oder mehrere Prozesse und/oder Massnahmentypen werden diese auch als nicht sinnvoll erachtet. Denn die Unsicherheiten in Bezug auf die Entwicklung der Naturgefahrenprozesse ist gross, sowie prozess- und gebietsspezifisch. Daher wäre die Formulierung pauschaler Sicherheitszuschläge nicht angemessen (siehe Kapitel 6). Gebiets-, prozess- und/oder massnahmenspezifische Analysen, die auf überschaubare Zusammenhänge fokussieren, können hingegen wertvolle Informationen für die konkrete Massnahmenplanung liefern. Hiervon sind aktuell erst wenige Untersuchungen vorhanden, die den Klimawandel berücksichtigen.

Ebenfalls kaum vorhanden sind methodische Hilfestellungen für die Massnahmenplanung in Anbetracht des Klimawandels. Es fehlen konsolidierte Vorgehensweisen wie der Klimawandel bei der Massnahmenplanung berücksichtigt werden kann.

Fazit Massnahmentyp



Hauptsächlich werden allgemeine, nicht massnahmenspezifische Angaben gegeben.



Quantitative Planungsgrundlagen sind nur in Einzelfällen vorhanden.



Es gibt kaum konsolidierte Vorgehensweisen, welche den Einbezug des Klimawandels bei der Massnahmenplanung unterstützen.

5.1.4 Zeit

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die gravitativen Naturgefahrenprozesse werden mit der Zeit zunehmen und gegen Ende des 21. Jahrhunderts deutlich stärker sein als in naher Zukunft. Studien, welche die Zukunft differenzierter betrachten unterscheiden meist zwischen zwei Zeitständen. Es wird die mittelfristige (um ca. 2050) und langfristige (Ende des 21. Jahrhunderts) Zukunft unterschieden (z.B. [32], [18], [19], [24] u.a.). Doch obwohl die Zeitkomponente wesentlich ist bei der Prognose der zu erwartenden Veränderungen, enthält die Mehrheit der betrachteten Studien wenig zeitliche Differenzierung bei der Betrachtung der Naturgefahrenentwicklung. Meist wird pauschal die „Zukunft“ betrachtet.

5.2 Fokus auf die zentralen Studien

Insgesamt wurden 12 untersuchte Studien mit Relevanz 1 bewertet, also als zentrale Dokumente, welche die Erarbeitung allgemeiner Strategien zum künftigen Umgang mit Naturgefahren unterstützen oder hilfreiche Informationen für die Massnahmenplanung enthalten. Analog der graphischen Überlagerung der drei Analysedimensionen aller untersuchten und in Steckbriefen erfassten Studien (Abbildung 7), erweist sich auch die graphische Zusammenfassung der zentralen Studien als wenig aussagekräftig: Alle Elemente der Dimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp sind abgedeckt (Abbildung 9).

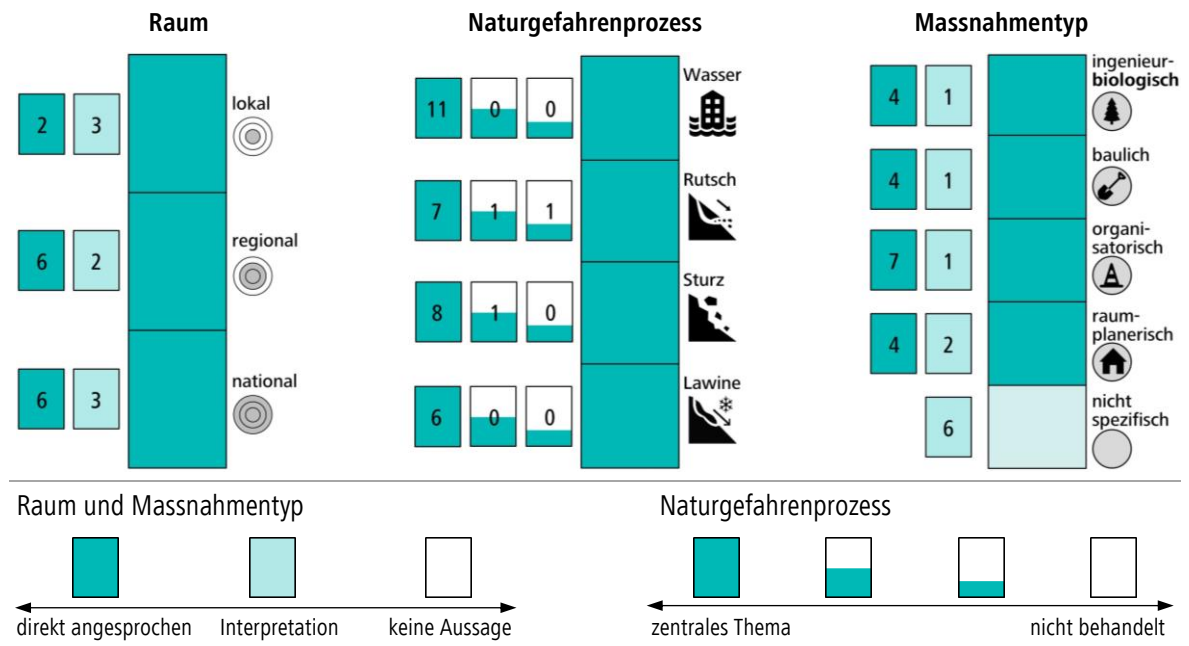


Abbildung 9: Überlagerung der drei Analysedimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp aus den Steckbriefen der als zentral bewerteten Studien. (Relevanz 1, total 12 Studien)
 Links neben den Analysedimensionen sind detailliertere quantitative Angaben zur Erhebung der einzelnen Elemente aufgeführt (z.B. ist der Prozess Sturz in 8 Studien zentrales Thema, in einer Studie wird er angesprochen, liegt aber nicht im Fokus der Untersuchung.)

Die 12 zentralen Studien werden weiter unterteilt in sechs Referenzen, die hauptsächlich allgemeingültige Aussagen enthalten und als Grundlage für die Ausarbeitung von Konzepten und Strategien zum Umgang mit Naturgefahren dienen können. Sechs weitere Studien enthalten Angaben, welche bei der konkreten Massnahmenplanung hilfreich sind. Tabelle 12 gibt einen Überblick über die Einordnung der Studien in die drei Analysedimensionen.

5.3 Stand des Wissens – Kurzübersicht

Gemäss den oben aufgeführten Zwischenfazits (Abbildung 7 und Abbildung 9) können die folgenden Hauptaussagen gemacht werden (Abbildung 10):

Raum: Es existieren hauptsächlich nationale und regionale Studien mit Schwerpunkt Alpenraum. Lokale Analysen mit Einbezug des Klimawandels in die Massnahmenplanung gibt es wenige.

Naturgefahrenprozess: Der Fokus liegt auf dem Prozess Wasser. Zu den Prozessen Rutschung, Sturz und Lawine gibt es wenig detaillierte und/oder inhaltlich gehaltvolle Aussagen. Einige Unterprozesse (statische Überschwemmung, Oberflächenabfluss, permanente Rutschung, verschiedene Lawinenarten) sowie Prozessketten werden gar nicht behandelt.

Massnahmentyp: Es sind v.a. allgemeine, nicht massnahmenspezifische Grundsätze vorhanden. Quantitative Planungsgrundsätze und konsolidierte Vorgehensweisen sind nur in Einzelfällen verfügbar.

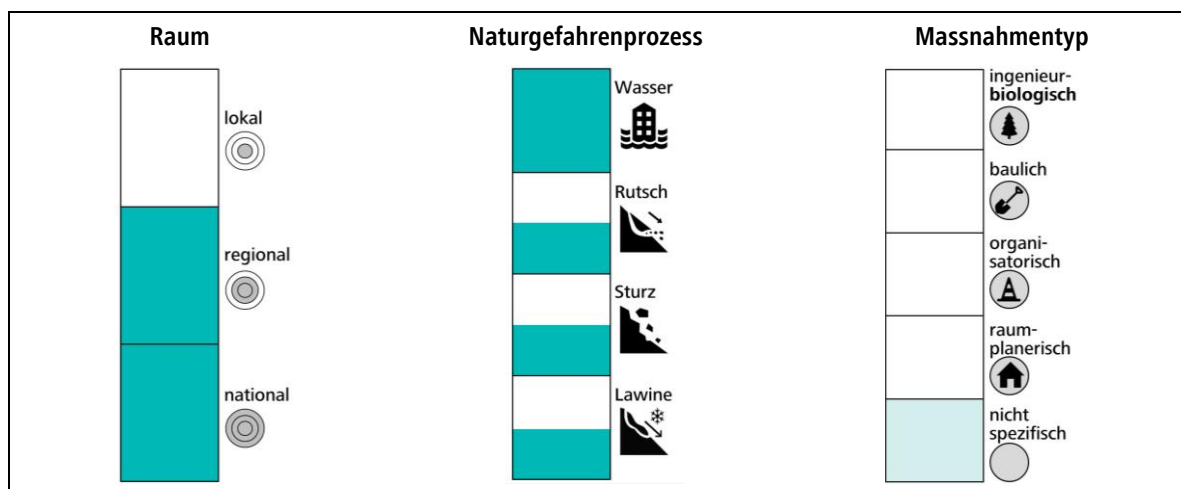


Abbildung 10: Vereinfachte Darstellung der in den untersuchten Studien behandelte Inhalte und den sich daraus ergebenden Lücken.

Tabelle 12: Überblick über die Analysedimensionen der als zentral bewerteten Studien

Allgemeine zentrale Studien		
<p>Brennpunkt Klima Schweiz [17]</p> <p>→ Konzept/Strategie - - - - -> Planung</p>	<p>Klimasensitivität Schweiz [30]</p> <p>→ Konzept/Strategie - - - - -> Planung</p>	<p>GHKperiGlazial [16]</p> <p>→ Konzept/Strategie - - - - -> Planung</p>
<p>CCHydro [19]</p> <p>→ Konzept/Strategie → Planung</p>	<p>Klimawandel Alpen [50]</p> <p>→ Konzept/Strategie → Planung</p>	<p>Europ. mountain cryosphere [24]</p> <p>→ Konzept/Strategie → Planung</p>
Massnahmenspezifische zentrale Studien		
<p>Impulse klimaangepasste CH [20]</p> <p>→ Konzept/Strategie → Planung</p>	<p>Klima – Hochwasserschutz [38]</p> <p>→ Konzept/Strategie → Planung</p>	<p>Klimawandel Wallis [44]</p> <p>→ Konzept/Strategie → Planung</p>
<p>Schutzwald [23]</p> <p>- - - - -> Konzept/Strategie → Planung</p>	<p>Fallstudie Klimawandel Saastal [22]</p> <p>- - - - -> Konzept/Strategie → Planung</p>	<p>Sturz im Permafrost [37]</p> <p>- - - - -> Konzept/Strategie → Planung</p>

Allgemeine Erkenntnisse zum Zusammenhang zwischen Naturgefahren und Klimawandel sind vorhanden. Das bedeutet, dass Grundlagen für die Ausarbeitung einer nationalen Strategie zum künftigen Umgang mit Naturgefahren bestehen. Stellenweise sind dazu aber noch Lücken zu schliessen (vgl. Fazit Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp in den Kapiteln 5.1.2 und 5.1.3).

Auch massnahmenspezifische Untersuchungen sind vorhanden. Diese sind jedoch sehr unterschiedlich, nämlich in Bezug auf den untersuchten Raum, die betrachteten Prozesse und die Allgemeingültigkeit ihrer Aussagen betreffend Massnahmen. In KOHS 2007 [38] werden allgemeine Empfehlungen für den Hochwasserschutz präsentiert, die in der gesamten Schweiz gelten. Empfehlungen für die spezifische Massnahme Schutzwald gelten ebenfalls in der gesamten Schweiz. [23] Prozess- und gebietspezifischer sind die Angaben zum Monitoring von hochalpinen Felsstürzen. [37] Ebenfalls gebietspezifisch sind die Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels und zu Anpassungsstrategien im Wallis. [22][44] Viele Prozesse, Räume und Massnahmentypen sind nicht aufgeführt. Daher liegt hier ein grosses Potential für weitere Untersuchungen und Studien. Einzelprojekte aus [20] und dem momentan laufenden Nachfolgeprojekt [56] werden einige Lücken schliessen. Prozess- und gebietspezifische Analysen werden auch in Zukunft die einzige Möglichkeit sein, um konkrete und wirksame Schutzmassnahmen zu planen (siehe Kapitel 6.3.2). Doch trotz der klaren Signale, dass der Klimawandel die Naturgefahrenprozesse beeinflusst, gibt es nur sehr wenige lokale Studien in welchen dieser in die konkrete Massnahmenplanung einbezogen wurde.

Nicht nur die inhaltlichen Angaben der zentralen Studien sind von Relevanz, sondern ebenfalls die methodischen Erkenntnisse, die daraus gezogen werden können. Analoge Projekte wie die in Kapitel 4.1.2 vorgestellten massnahmenspezifischen Studien, könnten mit Fokus auf andere Räume, Naturgefahrenprozesse oder Massnahmentypen einen Mehrwert generieren und weitere der immer noch zahlreich vorhandenen Wissenslücken schliessen.

Fazit zentrale Studien



Allgemeine Erkenntnisse, die als Basis für Konzepte und Strategien dienen können sind z.T. vorhanden. Planungsgrundlagen bestehen exemplarisch für einzelne Prozesse, Räume und/oder Massnahmentypen.



In Bezug auf die konkrete Massnahmenplanung bestehen weiterhin grosse Wissenslücken. Gebiets- und prozessspezifische Analysen bleiben für die Ausarbeitung wirksamer Massnahmen unumgänglich. Lokale Studien, bei welchen der Klimawandel in die konkrete Massnahmenplanung einbezogen wurde, gibt es nur wenige.

6 Erkenntnisse



Klimagrundlagen sind vorhanden

Es sind heute viele Grundlagen zur möglichen Entwicklung der Klimaindikatoren wie Temperatur und Niederschlag vorhanden. Auch wenn weiterhin Unsicherheiten bestehen, vor allem in Bezug auf die Entwicklung von Extremereignissen, ermöglichen die verfügbaren Grundlagen differenzierte Klimaprognosen bis Ende des 21. Jahrhunderts (siehe Kapitel 3).



Grundzüge der Entwicklung der Naturgefahrenprozesse sind bekannt

Der vorliegende Bericht und die darin referenzierten Studien zeigen, dass sehr viel Wissen zum Zusammenhang zwischen Klimawandel und Naturgefahren in der Schweiz vorhanden ist. Die vorhandenen Aussagen sind allerdings in unterschiedlicher Auflösung auf verschiedene Prozesse und Räume bezogen und auf viele verschiedene Dokumente verteilt. Grossräumige Untersuchungen sind meist entweder konzeptionell (z.B. [17]) oder auf die Betrachtung einzelner Prozesse beschränkt (z.B. [1][24]). Detaillierte Angaben zur künftigen Entwicklung einzelner Naturgefahrenprozesse sind in kleinräumigeren Einzelstudien zu finden (z.B. [31]). Die bestehenden Erkenntnisse liegen bisher meist wenig zusammengefasst vor. Einen ersten schweizweiten, räumlich differenzierten Überblick über die erwartete Entwicklung aller gravitativen Naturgefahrenprozesse bietet die Untersuchung Klimasensitivität Schweiz. [29][30] Die hier enthaltenen Aussagen sind jedoch qualitativ und berücksichtigen noch nicht die differenzierteren Klimaszenarien CH2018.

Trotz bestehender Unsicherheiten ist die Wissensgrundlage in Bezug auf die betrachteten gravitativen Naturgefahren ausreichend um den Klimawandel in der konkreten Massnahmenplanung zu berücksichtigen. Ebenfalls sind genügend Informationen vorhanden um eine allgemeine Handlungsempfehlungen zum künftigen Umgang mit den Naturgefahrenprozessen in der Schweiz auszuarbeiten bzw. die bestehende Strategie (siehe Kapitel 6.4) zu überarbeiten und gegebenenfalls anzupassen oder zu ergänzen.



Handlungsbedarf bei der Umsetzung

Es ist nicht möglich, die künftige Entwicklung der gravitativen Naturgefahrenprozesse auf nationaler Ebene ohne gebietsspezifischere Abklärungen zu beurteilen. Dafür sind die Systeme zu komplex und werden von zu vielen Parametern beeinflusst. Durch Fokussierung auf einzelne Gebiete (z.B. [31]), thematische Eingrenzung auf die jeweils massgebenden Prozesse (z.B. [38]) oder konkrete Schutzmassnahmen (z.B. [23]) werden die Zusammenhänge überschaubar und Unsicherheiten handhabbar. Ein einheitliches, kohärentes Vorgehen für den Umgang mit dem Klimawandel im integralen Risikomanagement fehlt. Hier besteht Handlungsbedarf. Ziel sollte sein, dass nicht nur das "Unmögliche gedacht" wird, sondern dass "Unmögliches Gedachtes" auch strukturiert abgeklärt wird.

Aus dem vorhandenen Wissen zu den Prozessen aber auch aus dem Wissen über die bestehenden Unsicherheiten (Kapitel 6.1) können spezifische Empfehlungen für die Planung von Schutzmassnahmen abgeleitet werden (Kapitel 6.3). Diese Erkenntnisse werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

6.1 Bestehende Unsicherheiten

Die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels ist untrennbar mit der Auseinandersetzung mit Unsicherheiten verbunden. [50] Für ein nachhaltiges Naturgefahrenmanagement müssen mögliche Unsicherheitsquellen bekannt und sein und in der Massnahmenplanung berücksichtigt werden. Der Ursprung der Unsicherheiten ist vielfältig. Bei der Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf die gravitativen Naturgefahrenprozesse können die Unsicherheiten u.a. zusammenhängen mit



dem Klimasystem selbst und dessen regionaler und lokaler Ausprägung und dessen natürliche Variabilität
(Kapitel 6.1.1)



den Naturgefahrenprozessen selbst und ihrer Beeinflussung durch das sich ändernde Klima
(Kapitel 6.1.2)



den Messungen, Methoden, Modellen und Interpretationen
(Kapitel 6.1.1 und 6.1.2)



und schliesslich auch der Entwicklung des Kulturraums, die massgebend ist für die Treibhausgasemissionen und die Risikoentwicklung (Kapitel 6.1.3)

Im Folgenden werden Unsicherheitsquellen auf unterschiedlichen Ebenen angesprochen. Die sich jeweils daraus ergebenden Empfehlungen für die Forschung und Praxis oder die Massnahmenplanung werden graphisch hervorgehoben. Sie werden in den Kapiteln 6.2 resp. 6.3 wieder aufgenommen und besprochen.



Empfehlungen für Forschung und Praxis
besprochen in Kapitel 6.2



Empfehlungen für die Massnahmenplanung
besprochen in Kapitel 6.3

Auch weiterführende, nicht naturgefahrenspezifische Herausforderungen im Umgang mit dem Klimawandel werden in Kapitel 7.2 aufgegriffen.



Allgemeine Herausforderungen beim Umgang mit dem Klimawandel
besprochen in Kapitel 7.2

6.1.1 Unsicherheiten in Bezug auf die Klimaprognosen

Globale und regionale Klimaprognosen

Zum einen sind die von den Treibhausgasemissionen abhängige Entwicklung des Klimas selbst ungewiss sowie auch die auf verschiedenen Emissionsszenarien basierenden Klimaprojektionen Unsicherheiten ausgesetzt (Abbildung 11).

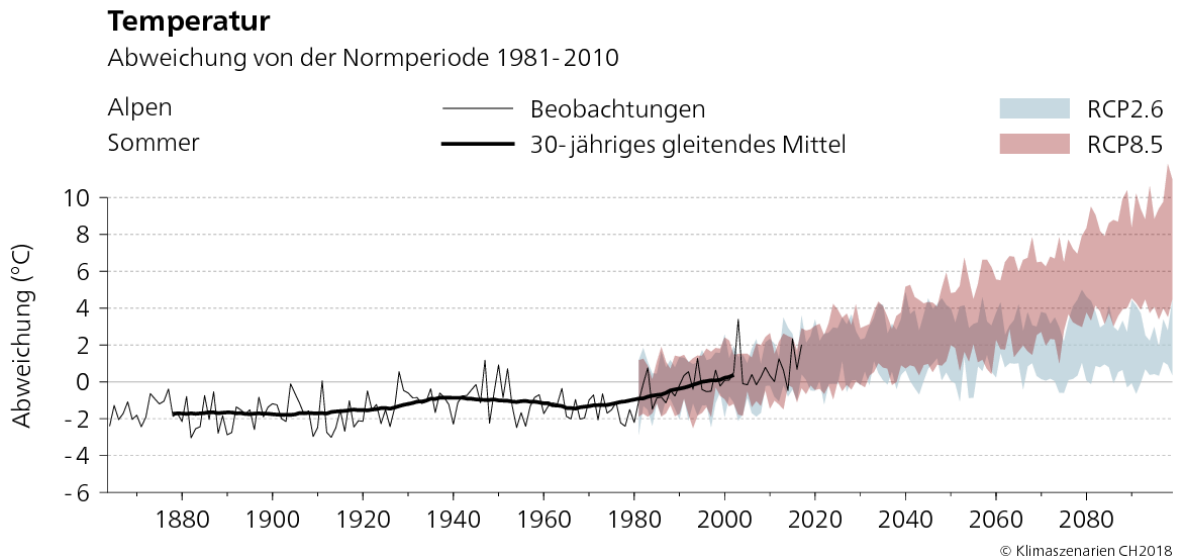


Abbildung 11: Temperaturprognose für die Schweizer Alpen [66]

Der regionale oder lokale Klimawandel, der relevant ist für die Beeinflussung der Naturgefahrenprozesse in der Schweiz, ist schwieriger zu prognostizieren als der globale. Er ist primär durch die kleinräumige Verteilung der Wärme, Veränderungen der Strömungen in der Atmosphäre sowie u.a. durch Landprozesse, Schnee- und Eisbedeckung beeinflusst, die viel schwieriger zu bestimmen sind, als globale Grössen. [17] Unsicherheitsquellen bei der gebietsspezifischen Vorhersage betreffen unbekannte zukünftige Treibhausgasemissionen sowie Fehler und Vereinfachungen in globalen Klimamodellen und regionalen Klimamodellen oder den statistischen Downscaling-Methoden. [33]

Während Temperaturprognosen unterschiedlicher Klimaprojektionen relativ gut übereinstimmen, sind die Unsicherheiten bezüglich der Niederschlagsentwicklung grösser. Und obwohl Veränderungen der Klimaextreme wahrscheinlich sind, sind ihre Projektionen höchst unsicher. (IPCC 2011 in [39])

Natürliche Variabilität

Auf der vergleichsweise kleinen Fläche der Schweiz sind Änderungstendenzen in Klimaentwicklung und Wetterextremen von starker natürlicher Variabilität überlagert und ihr Nachweis daher schwierig. Die kurzfristigen natürlichen, kaum voraussehbaren Schwankungen des Klimas überlagern die langfristige menschengemachte Klimaänderung. Diese natürliche Variabilität über Jahre bis Jahrzehnte ist für einen grossen Teil der Prognoseunsicherheit für einzelne Orte, für kurzfristige Zeitspannen und besonders auch für Extremereignisse verantwortlich. [17] Gleichzeitig können Änderungen der natürlichen Schwankungen wie z.B. der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen die Häufigkeit von seltenen Ereignissen entscheidend beeinflussen. Aufgrund ihrer Seltenheit stösst der Nachweis von Trends bei Extremereignissen an grundsätzliche Grenzen. Extreme Ereignisse sind daher nur bedingt geeignete Indikatoren für den Klimawandel.[48]

Die bestehenden Unsicherheiten in Bezug auf die Klimaprognose setzen sich in den Prognosen der Naturgefahrenprozesse fort und müssen bei der Massnahmenplanung berücksichtigt werden:



Die Formulierung starrer, pauschaler Zuschläge ist in Anbetracht der lokalen Gegebenheiten, der bestehenden Unsicherheiten und des Wandels nicht geeignet. (Kapitel 6.3)

Lokale Analysen

Je kleinräumiger das Untersuchungsgebiet, desto schwieriger ist die Prognose der Auswirkungen des Klimawandels. Doch genau die hier stattfindenden Prozesse sind relevant für die Entwicklung und Auslösung von Naturgefahrenprozessen.

Es gilt daher die lokalen Gegebenheiten genau zu analysieren:



Schutzmassnahmen sind gebietsspezifisch auszuarbeiten. (Kapitel 6.3)

Dafür wäre die Verfügbarkeit und Verwendung kleinräumiger Klimaprognosen von Vorteil. Aktuell sind die Unsicherheiten bei der Prognose von Naturgefahrenprozessen u.a. aufgrund der noch groben räumlichen Auflösung der Klima- und Modelldaten beträchtlich (siehe z.B. [53]). Empfohlen wird daher:



Kleinräumige (regionale und lokale) Klimagrundlagen sind zu generieren und in der Gefahrenanalyse von Naturgefahrenprozessen zu beachten. (Kapitel 6.2)

Bedeutung der verwendeten Klimaszenarien

Trotz der nicht zu eliminierenden Unsicherheiten sind die Klimaszenarien relevant. Verschiedene Studien weisen auf die grosse Bedeutung der verwendeten Klimaszenarien bei der Prognose von Naturgefahrenprozessen hin (z.B. [25], [35], [39], [40] und [54]). Die Wahl der Klimaszenarien ist nicht selten bedeutender für die Modellierungsergebnisse als die Wahl der Modellparameter.



Um Modellunsicherheiten auch in den Impaktanalysen zu berücksichtigen, sollten diese nicht auf einzelnen Projektionen, sondern auf Ensembles basieren. (Kapitel 6.2)



Aufgrund des grossen Einflusses der verwendeten Klimaszenarien auf die Prognose der Naturgefahrenprozesse, sollten die Studien auf den jeweils vertrauenswürdigsten Szenarien basieren und bei Bedarf aktualisiert werden. (Kapitel 6.2)

6.1.2 Unsicherheiten in Bezug auf die Entwicklung der Naturgefahrenprozesse

Verständnis der Naturgefahrenprozesse

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Naturgefahrenprozesse in den Alpen sind komplex und prozessspezifisch [47]. Folglich gilt:



Schutzmassnahmen sind prozessspezifisch auszuarbeiten (Kapitel 6.3)

Inhaltliche Erkenntnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Naturgefahrenprozesse sind zum einen abhängig von der Sensitivität der Prozesse auf die klimatischen Veränderungen als auch von der Komplexität der Prozesse an und für sich. So gibt es beispielsweise abgeleitet von Temperatur- und Niederschlagsprognosen relativ vertrauenswürdige Aussagen zur qualitativen Hochwasserentwicklung in der Schweiz (z.B. [17] und [39]) dagegen aber kaum Prognosen bezüglich Felssturzereignissen, welche durch unzählige verschiedene z.T. weitgehend klimaunabhängiger Faktoren beeinflusst werden (z.B. [50], [42] und [37]).

Das theoretische Verständnis für den Zusammenhang zwischen Naturgefahrenprozessen und dem Klimawandel besteht in vielen Fällen. Der jeweilige statistische, quantitative Nachweis dieser Zusammenhänge ist aber aufgrund der Seltenheit der Beobachtungen schwierig (siehe folgenden Abschnitt seltene Naturgefahrenereignisse). Aufzeichnungen sind meist zu kurz um angesichts der natürlichen Variabilität der Prozesse Trends in der Zeitreihe zu erkennen. [39] Bei den Naturgefahren sind die natürlichen Schwankungen so gross und die Prozesse so kleinräumig, dass Aussagen sowohl zu heutigen Trends als auch zur künftigen Entwicklung unsicher sind. [17] Werden dennoch Änderungen in den Naturgefahrenprozessen erkannt, sind diese nicht immer eindeutig auf das Klima zurückzuführen. [22]

Naturgefahrenprozesse sind dynamisch und ihre periodische Neubeurteilung ist daher angezeigt:



Die Auswirkung des Klimawandels auf die Naturgefahrenprozesse sollte periodisch neu beurteilt werden und insbesondere dann erfolgen, wenn in Bezug auf die Naturgefahrenprozesse relevante neue Erkenntnisse zum Klimawandel vorliegen.

Aufgrund der Unsicherheiten und in Anbetracht der Dynamik und Komplexität der Naturgefahrenprozesse, sind starre Vorgaben bei der Massnahmenplanung nicht sinnvoll.



Massnahmen müssen robust, flexibel und überlastbar sein. (Kapitel 6.3)

Viele Naturgefahrenprozesse treten auf sehr lokalen Skalen auf, so dass sie selbst nach der Anwendung von guten Downscaling-Methoden nur schwer mit den Ergebnissen der Klimamodelle in Beziehung gesetzt werden können. [24] Es bedarf daher in Bezug auf jeden Prozess und jeden Raum einer spezifischen, detaillierten Untersuchung.



Schutzmassnahmen sind prozess- und gebietsspezifisch auszuarbeiten (Kapitel 6.3)

Prozessmodellierung

Bei der Erklärung der Zusammenhänge zwischen Klimawandel und sich ändernden Naturgefahren bestehen noch grosse Wissenslücken. [22] Die Genauigkeit mit welcher die Veränderungen der Naturgefahrenprozesse abgeschätzt werden können ist sehr unterschiedlich und v.a. abhängig von der Komplexität der Prozesse. Unsicherheitsquellen sind u.a. die Modelle, mit welchen

die Prozesse analysiert werden und ebenfalls die darin verwendeten Parametersätze. Im Allgemeinen nimmt unser Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels ab, wenn die Anzahl der in die Wirkungsanalyse einzubeziehenden Parameter steigt. [50] Die Spannbreite der Ergebnisse verschiedener Modellketten ist sehr gross. Präzise Prognosen in welchem Ausmass Extremereignisse und dementsprechend seltene Naturgefahrenereignisse zunehmen werden, sind daher nicht möglich. [51] Wiederholt zeigt sich der bereits erwähnte Grundsatz:



Die Formulierung starrer, pauschaler Zuschläge ist in Anbetracht der lokalen Gegebenheiten, der bestehenden Unsicherheiten und des Wandels nicht geeignet. (Kapitel 6.3)

Seltene Naturgefahrenereignisse

Sehr grosse Naturgefahrenereignisse sind aufgrund ihres seltenen Eintretens als Extremereignisse zu bezeichnen. Diese sind schwierig zu charakterisieren, wenn die verfügbaren Beobachtungen und Messreihen kürzer sind als die Wiederholungsintervalle der Ereignisse. In der Regel reicht die Länge der Zeitreihe von (sehr) seltenen Ereignissen nicht aus, um zuverlässige Schätzungen für diese Ereignisse zu erhalten. [51] Statistische Aussagen zu Magnitude und Häufigkeit von Gefahrenprozessen sind mit Ausnahme von Hochwasserereignissen kaum herzuleiten, da sie zu selten auftreten. Die vergangenen Ereignisse alleine sind demnach keine verlässliche Basis für die Prognose künftiger Naturgefahrenprozesse. Das nichtstationäre Verhalten des Klimas fügt zusätzliche Unsicherheiten hinzu (siehe nächster Abschnitt Prozessketten und bisher unbekannte Ereignisgrößen). Ein Trend für (sehr) seltene Naturgefahrenereignisse lässt sich nur sehr ungenau bestimmen und kann stark beeinflusst werden durch zufällige Ereignishäufungen am Anfang oder am Ende der Beobachtungsperiode. [45] Dementsprechend sind die vergangenen Naturgefahrenereignisse alleine auch keine verlässliche Basis für die Ausarbeitung künftiger Schutzmassnahmen:



Schutzmassnahmen sind nicht nur auf Basis vergangener Ereignisse zu planen, sondern zusätzlich ist der Klimawandel zu berücksichtigen (Kapitel 6.3)

Für ein kohärentes Vorgehen und als Hilfestellung sind einheitliche Abläufe zu dokumentieren:



Es sollen Konzepte geschaffen werden für ein transparentes und systematisches Vorgehen bei der Gefahrenbeurteilung und Planung von Schutzmassnahmen. (Kapitel 6.3)

Prozessketten und bisher unbekannte Ereignisgrößen

Unter dem Einfluss des Klimawandels können sich der betroffene Raum, die Intensität und die Frequenz der Naturgefahrenprozesse ändern. [47] Es ist davon auszugehen, dass künftig Ereignisse auftreten werden, die über die historischen Erfahrungen hinausgehen. [33] Beispielsweise könnte der Anstieg der Permafrostgrenze zu Murgängen bisher unbekanntes Ausmasses führen, auch an Orten, die bisher nicht betroffen waren. Auch Felssturz und Steinschlag können neu in bisher kaum betroffenen Gebieten auftreten. [44] Wenn möglich, sollte man sich auf diese Eventualitäten vorbereiten.



Der Klimawandel ist in der Gefahrenbeurteilung zu berücksichtigen (Kapitel 6.3)

Um die mögliche Zunahme der Ereignisintensitäten zur berücksichtigen, sollte ausserdem der Überlastfall betrachtet werden:



Der Überlastfall ist bei der Massnahmenplanung systematisch zu bedenken. Massnahmen müssen robust, flexibel und überlastbar sein. (Kapitel 6.3)

Da diese Veränderungen der Naturgefahrenprozesse zur Folge haben, dass beobachtete Zeitreihen aus der Vergangenheit ihren Wert als Massstab für die Zukunft verlieren, müssen sie mit den Erkenntnissen aus den Klimaszenarien kombiniert und neu gewichtet werden. [17] Langzeitbeobachtungen alleine reichen nicht mehr aus für ein vertieftes Verständnis des Zusammenhangs zwischen Klimaänderung und Extremereignissen, sie sind aber dennoch eine wesentliche Grundlage dafür. [45] Es gilt daher:



Messreihen und Beobachtungen von Ereignissen sind zwingend weiterzuführen. Für die Prognose künftiger Ereignisse sind sie mit den Erkenntnissen aus den Klimaszenarien zu kombinieren. (Kapitel 6.2)

Gelangt das natürliche System durch Belastungen wie Extremereignisse (langanhaltende Niederschlagsperioden, extreme Hochwasser o.Ä.) aus dem Gleichgewicht, kann dies zu Kippeffekten oder Rückkopplungen führen. [17] Prozessketten und -kombinationen, also Abfolgen von verschiedenen, zeitlich hintereinander gestaffelten und gekoppelten Prozessen müssen unbedingt berücksichtigt werden. Insbesondere in den stark von Topographie geprägten Gebieten muss sich die Schweiz auf neuartige Entwicklungen und veränderte Naturgefahren einstellen. [17] Für die Massnahmenplanung bedeutet das:



Bei der Massnahmenplanung muss an das „Unmögliche“ gedacht werden: mögliche Prozesskombinationen sind strukturiert abzuklären (Kapitel 6.3)

Da sie eine detaillierte gebiets- und prozessspezifische Analyse benötigen, sind Prozessketten kaum allgemein abzuhandeln. Das gleiche gilt für die Schutzmassnahmen:



Schutzmassnahmen sind prozess- und gebietsspezifisch auszuarbeiten (Kapitel 6.3)

6.1.3 Unsicherheiten in Bezug auf die Entwicklung des Kulturrums

Unsicherheiten bestehen insbesondere auch bei der Prognose anthropogener Veränderungen. Bei Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Klimawandel und Naturgefahrenprozessen sind die Veränderungen des Kulturrums, also der anthropogenen Veränderungen in verschiedener Hinsicht von Bedeutung.

Entwicklung der Treibhausgasemissionen

Alle Klimaprognosen basieren auf Prognosen der Treibhausgasemissionen, für die hauptsächlich der Mensch verantwortlich ist. Klimaprognosen sind demnach untrennbar mit Prognosen zur gesellschaftlichen, ökonomischen und technischen Entwicklung verbunden.



Neben Anpassungsmassnahmen sind ebenfalls Massnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen zu ergreifen. (Kapitel 7.2)

Risikoentwicklung

Für die Prognose zukünftiger Risiken sind neben der Dynamik im Bereich der Naturgefahrenprozesse ebenfalls die Entwicklung der Wirtschaft und Bevölkerung zu berücksichtigen. Je nach künftiger Entwicklung der Gesellschaft könnten sich die Auswirkungen des Klimawandels verschärfen oder abschwächen. [43]



Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Naturgefahrenprozesse sind nicht isoliert zu betrachten, sondern im Zusammenhang mit weiteren Veränderungen und aus verschiedenen Blickwinkeln. (Kapitel 7.2)

Beurteilung von Gefahren und Bewertung von Schutzmassnahmen

Gefahrenbeurteilungen unterliegen einem Interpretationsspielraum, auch wenn sie jeweils durch Fachpersonen durchgeführt werden. Um den vielfältigen Unsicherheitsquellen gerecht zu werden, aber doch einen möglichst vergleichbaren und transparenten Umgang mit dem Klimawandel zu erreichen, sollten methodische Leitlinien geschaffen werden für den Einbezug des Klimawandels in die prozess- und gebietsspezifische Gefahrenbeurteilung.



Es sollen Konzepte geschaffen werden für ein transparentes und systematisches Vorgehen bei der Gefahrenbeurteilung und Planung von Schutzmassnahmen. (Kapitel 6.3)

Und schliesslich ist die Beurteilung von Schutzmassnahmen eine Ermessensfrage des Menschen. Die Notwendigkeit von Anpassungsmassnahmen ist zum einen abhängig von der Beeinflussung der Naturgefahrenprozesse durch den Klimawandel und zum anderen von der Bedeutung des Prozesses für den Menschen. Die Prozesse, die momentan am stärksten und eindeutigsten durch den Klimawandel beeinflusst sind, haben relativ geringe ökonomische Bedeutung (z.B. Gletscher und Permafrost). Für die Gesellschaft von viel grösserer Bedeutung sind Hochwasser v.a. in urbanen Gebieten, deren Beeinflussung durch den Klimawandel etwas weniger offensichtlich ist. [47]

6.2 Empfehlungen für Forschung und Praxis

In Anbetracht der bestehenden, in Kapitel 6.1 beschriebenen Unsicherheiten, ergaben sich grob folgende Empfehlungen:



- Datengrundlagen bereitstellen
- Räumlich und zeitlich differenzierte Klimagrundlagen generieren
- Studien aktuell halten und auf Ensembles basieren

6.2.1 Datengrundlagen bereitstellen

Repetition der Erkenntnisse aus Kapitel 6.1



Messreihen und Beobachtungen von Ereignissen sind zwingend weiterzuführen. Für die Prognose künftiger Ereignisse sind sie mit den Erkenntnissen aus den Klimaszenarien zu kombinieren.

Es wird in Zukunft darauf ankommen gute Datengrundlagen zur Verfügung zu haben um effektive und effiziente Massnahmen der Anpassung an den Klimawandel ableiten zu können. [22] Die Betrachtung vergangener Ereignisse darf künftig nicht als Massstab und einzige Grundlage für die Ausarbeitung neuer Schutzmassnahmen dienen (siehe Abschnitt seltene Naturgefahrenereignisse in Kapitel 6.1.2). Nichtsdestotrotz sind Beobachtungsreihen wichtige Grundlagen für die Gefahrenanalyse und Risikoabschätzung. Des Weiteren sind Messdaten wichtig für die Erstellung und Kalibrierung von Modellen. Das Weiterführen von z.B. Ereigniskatastern ist zentral, da es nach wie vor die einzige Möglichkeit ist um gewisse Trends frühzeitig zu erkennen und anzugehen. [22] Für die Prognose im Hinblick auf den Klimawandel müssen die Beobachtungen jedoch mit weiteren Informationen ergänzt und verschiedenen Methoden kombiniert werden: Eine umfassende Risikoabschätzung erfordert eine Kombination von langen Messreihen und historischen Aufzeichnungen, physikalischem Prozessverständnis und Klimamodellsimulationen. [17]

Das Bereitstellen von Grundlagedaten ist von zentraler Bedeutung, um weiterführende Auswertungen im Hinblick auf den Klimawandel zu machen. Wenn Grundlagen fehlen, zieht sich diese Lücke meist durch die gesamte Forschung hindurch weiter. Es können in diesem Falle keine weiterführenden Studien erstellt werden. Deutlich wird dies z.B. bei der Untersuchung der Klimasensitivität Naturgefahren [30], wo wegen fehlender bzw. nicht flächendeckend zur Verfügung stehender Grundlagen die Klimasensitivität von permanenten Rutschungen nicht bestimmt werden konnte.

6.2.2 Klimagrundlagen verfeinern

Repetition der Erkenntnisse aus Kapitel 6.1



Kleinräumige (regionale und lokale) Klimagrundlagen sind zu generieren und in der Gefahrenanalyse von Naturgefahrenprozessen zu beachten.

Die Resultate der diesem Bericht zugrunde liegenden untersuchten Studien sind meist grossräumig und lassen insgesamt wenig räumliche Differenzierung bei der Prognose von Naturgefahrenprozessen zu. Wenn die Inputdaten, in diesem Falle insbesondere die Klimagrundlagen grossräumig sind, kann der Output nicht auf lokale Bedingungen umgerechnet werden und räumlich differenzierter sein. Dass höhere räumlich und zeitlich aufgelöste Klimagrundlagen einen Mehrwert bei der Prognose der kleinräumigen Naturgefahrenprozesse bringen, zeigen u.a. [51] und [31]. Es sollte daher im allgemeinen Interesse liegen, kleinräumige Klimagrundlagen bereitzustellen.

Um unser Verständnis zu den Rückkoppelungen zwischen Atmosphäre, Hydrosphäre und Kryosphäre zu vertiefen, müssen die physikalischen Modelle stetig verbessert und der freie Zugang zu zeitlich und räumlich hochaufgelösten Daten gewährleistet werden. So können die Treibhausgasszenarien in die Auswirkungen auf die Naturgefahren übersetzt werden. [24]

6.2.3 Studien aktualisieren

Repetition der Erkenntnisse aus Kapitel 6.1



Studien sollten auf den jeweils vertrauenswürdigsten Szenarien und auf Ensembles von Klimaprojektionen basieren und bei Bedarf aktualisiert werden.



Die Auswirkung des Klimawandels auf die Naturgefahrenprozesse sollte periodisch neu beurteilt werden und insbesondere dann erfolgen, wenn neue Erkenntnisse zum Klimawandel vorliegen.

Nach dem Erscheinen neuer Klimagrundlagen vergeht einige Zeit, bis Studien auf dieser Szenarienbasis publiziert werden. So lag für die vorliegende Auswertung nur eine einzige Studie auf Basis von CH2018 vor. In dieser zeigen Ragettli et al. [51] exemplarisch den Mehrwert auf, den der Einbezug der neuen Klimagrundlagen CH2018, insbesondere der Einbezug von zeitlich und räumlich höher aufgelösten Prognosedaten, bringen kann:

"Unsere Ergebnisse zeigen, wie wichtig es ist, stündliche Zeitschritte bei der Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf sommerliche Hochwasserextreme in gebirgigen Einzugsgebieten zu berücksichtigen." In stündlichen Daten spiegeln sich die relevanten Veränderungen in den Wasserprozessen deutlicher wider als in täglich aufgelösten Zeitschritten. Ebenfalls wichtig ist die Differenzierung der räumlichen Skala. Viele sommerliche Hochwasserereignisse in den Schweizer Alpen werden durch konvektive Niederschlagsereignisse verursacht, deren räumliche Ausdehnung begrenzt ist. [51]

Neue Möglichkeiten, die sich mit den Klimaszenarien CH2018 ergeben sind insbesondere:



bessere Abdeckung von Extremen



verbesserte räumliche Auflösung



Untersuchungen von Höhenabhängigkeiten


Es bleiben auch bei den Klimaszenarien CH2018 Unsicherheiten bestehen, insbesondere bei den Extremereignissen. Doch es gibt bereits heute Wege damit umzugehen. So zeigen z.B. Scherrer et al. [52], dass die Intensität von Starkniederschlägen analog der Clausius-Clapeyron Beziehung um 6-7 % pro Grad Erwärmung zunehmen (siehe Kapitel 3).

Damit weiterhin bestehende Modellunsicherheiten in den Impaktanalysen berücksichtigt werden können, sollten diese nicht auf einzelnen Projektionen, sondern auf Ensembles basieren, wie es z.B. in [32] gehandhabt wurde.

Die periodische Neubeurteilung von Risiken und Strategien ist gemäss [44] ein wichtiges Prinzip im Umgang mit Naturgefahren und sollte insbesondere dann erfolgen, wenn neue Erkenntnisse zum Klimawandel vorliegen.

6.3 Empfehlungen für die Massnahmenplanung

Die Akademie der Wissenschaften Schweiz (2016:14) schreibt: "Die mit der Klimaänderung verbundenen Problemfelder sind weitgehend identifiziert und Lösungsansätze vorhanden. Es lassen sich bereits heute konkrete Handlungsempfehlungen für die Schweiz ableiten." [17] Solche werden im Folgenden präsentiert. Die in Kapitel 6.1 aufgeführten Erkenntnisse können in folgende übergeordnete Empfehlungen für die Massnahmenplanung zusammengefasst werden:



Schutzmassnahmen...

- ...sollen die bestehenden Unsicherheiten berücksichtigen
- ...sind prozess- und gebietsspezifisch auszuarbeiten
- ...sollen auf einer Gefahrenanalyse basieren, welche den Klimawandel berücksichtigt
- ...sollen methodisch einheitlich erarbeitet werden
- ...sollen vorausschauend geplant werden

6.3.1 Bestehende Unsicherheiten abfangen

"Die Klimaänderung erfordert Anpassungen, reduziert aber gleichzeitig die Planungssicherheit", schreiben die Akademie der Wissenschaften Schweiz (2016:121) [17]. In Bezug auf gravitative Naturgefahren und deren Beeinflussung durch den Klimawandel werden weiterhin verschiedene Unsicherheitsquellen bestehen bleiben (Abbildung 12). Die Summe aller in Kapiteln 6.1 angesprochenen Unsicherheiten münden in einer Bandbreite von Prozessprognosen. Diese gilt es in der Massnahmenplanung zu berücksichtigen bzw. darauf zu reagieren.

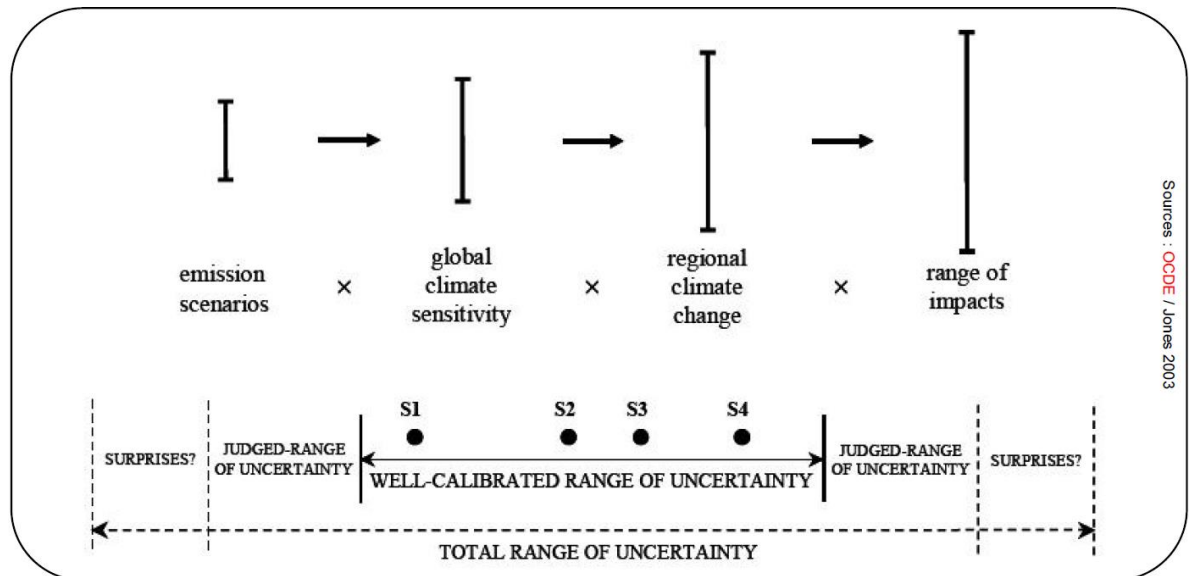


Abbildung 12: Schematische Darstellung verschiedener Unsicherheitsquellen bei der Analyse der Auswirkungen des Klimawandels (OECD 2003 in [50])

Andreas Fischer von MeteoSchweiz zeigte anlässlich des FAN-Forum 2020 auf Basis von Auswertungen auf regionalen Klimamodellen auf, dass zukünftige Starkniederschläge über der bisherigen besten Schätzung (Mittelwert) liegen, aber noch innerhalb der bestehenden, heute ausgewiesenen Unsicherheiten der Extremwertstatistik. Entsprechend ist für die Bemessung von Schutzmassnahmen der obere Wertebereich der Bandbreite relevant. [65]

Repetition der Erkenntnisse aus Kapitel 6.1



Unsicherheiten und Dynamiken müssen berücksichtigt werden. Die Formulierung starrer, pauschaler Zuschläge ist demnach nicht geeignet. Vielmehr gelten folgende Grundsätze:

- Massnahmen müssen robust und flexibel sein
- der Überlastfall ist systematisch zu bedenken
- mögliche Prozesskombinationen sind strukturiert abzuklären

Robuste und flexible Massnahmen

Die Unsicherheiten bei der Prognose der Veränderungen der Naturgefahrenprozesse im Zuge des Klimawandels sind auch mit den neusten Forschungsgrundlagen noch gross. Zudem sind Kettenreaktionen und Prozesskombinationen möglich, die heute kaum vorhersehbar sind. Es bleibt demnach in Bezug auf die Schutzmassnahmen wenig anderes übrig als diese flexibel und robust zu planen und den Überlastfall zu berücksichtigen. Starre pauschale Angaben zur Bemessung von z.B. baulichen Massnahmen sind kaum möglich und ausserdem im Anbetracht der grossen prozess- und gebietsabhängigen Unsicherheiten und des hoch dynamischen Systems nicht sinnvoll (nach [47]). Es sind im Gegensatz gemäss MeteoSchweiz und PLANAT „anpassungsfähige Lösungen gefragt, die den heutigen Bedürfnissen genügen und sich flexibel an möglicherweise höhere zukünftige Anforderungen anpassen lassen“ und so möglichst unabhängig von der Klimaänderung wirksam bleiben [43]. Um dieses Ziel zu erreichen, sind nicht Einzelmassnahmen, sondern am besten ein Gefüge von verschiedenen Massnahmen zu betrachten. (z.B. [47]) Wichtiges Prinzip bei der Massnahmenplanung zum Schutz vor Naturgefahren im Hinblick auf den Klimawandel ist die Evaluation unterschiedlicher Handlungsalternativen (technisch-baulich, biologisch, organisatorisch, planerisch) und gleichzeitiger Wahrung des Handlungsspielraums durch anpassbare, flexible Lösungen. [44] Flexible Massnahmen sind zu bevorzugen. [17]

Nicht nur im Hinblick auf den Klimawandel sollten Massnahmen die Ansprüche an Robustheit und Flexibilität erfüllen. Denn die Dynamik der Prozesse ist nicht immer durch den Klimawandel zu begründen. Die Grenze zwischen der Klimaänderung und anderen Effekten, welche das Ergreifen von Schutzmassnahmen notwendig machen, ist nicht immer klar und eindeutig zu ziehen. [22]

Überlastfall und Prozesskombinationen bedenken

Unter anderem weil in Zukunft Ereignisse ohne historische Vergleiche möglich werden (siehe Abschnitt „Prozessketten und bisher unbekannte Ereignisgrössen“ in Kapitel 6.1.2), müssen Worst-case-Szenarien geprüft und robuste Lösungen erarbeitet werden. Solche Szenarien sind in der Massnahmenplanung bei der Abklärung des Überlastfalls zu berücksichtigen. [44] Es darf keinesfalls vergessen werden, dass es keine absolute Sicherheit gibt und es immer auch "unknown unknowns" geben wird, also unbekannte Faktoren oder Entwicklungen, derer man sich nicht bewusst ist. [17]

6.3.2 Prozess- und gebietsspezifische Analysen

Repetition der Erkenntnisse aus Kapitel 6.1



- Schutzmassnahmen sind prozess- und gebietsspezifisch auszuarbeiten
- Mögliche Prozesskombinationen sind strukturiert abzuklären

Der Klimawandel ist ein globales Phänomen. Seine Auswirkungen sind lokal spürbar und können innerhalb weniger Kilometer z.B. aufgrund unterschiedlicher Topographie oder des Mikroklimas stark variieren. Besonders in Gebirgsregionen weisen natürliche Standortparameter wie Höhe,

Temperatur, Niederschlag, Lage bzw. Bodentypen kleinräumigen Änderungen auf. [61] Demnach kann es für die Schweiz kein allgemeingültiges, national geltendes vorgefertigtes Schema für die Anpassung an den Klimawandel geben. Aufgrund der grossen örtlichen und zeitlichen Unterschiede der Auswirkungen des Klimawandels müssen Anpassungsmassnahmen so geplant und umgesetzt werden, dass sie die konkreten Bedingungen vor Ort berücksichtigen. [17] Lokale, prozessspezifische Untersuchungen der Naturgefahren bleiben unabdingbar. Die konkrete Risikoentwicklung auf lokale Siedlungen und Infrastrukturen kann aufgrund der Komplexität der einzelnen Prozesse und Gefahrenstellen nur mit detaillierten geologischen, geomorphologischen, hydrologischen und glaziologischen Gutachten beurteilt werden. [22]

6.3.3 Einbezug des Klimawandels in die Gefahrenbeurteilung

Repetition der Erkenntnisse aus Kapitel 6.1



Der Klimawandel ist in der Gefahrenbeurteilung zu berücksichtigen

Die Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen Wetter, Klima und Naturgefahren als eine sich ändernde Rahmenbedingung wird für Planungsaufgaben immer wichtiger werden. [43] Im Rahmen von Planungsprozessen (z.B. Revision der Ortsplanung, Ausbau von Verkehrswegen) und somit auch in der Erarbeitung von Gefahrenkarten als Grundlage dieser Planungen, sollen auch mittelfristige Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigt werden [44]. Verlässliche Klimaprojektionen und darauf basierende Gefahrenkarten, sowie eine konsequente Umsetzung der Erkenntnisse durch konkrete überprüfbare Gesetze und Regeln können teure zukünftige Investitionen aufgrund veränderter klimatischer Verhältnisse minimieren. [17]

In verschiedenen Pflichtenheften der Kantone für die Erstellung von Gefahrenkarten ist der Umgang der mit Klimaänderung explizit aufgeführt. So steht z.B. im Pflichtenheft des Kantons Bern: „Sind bei einzelnen Prozessquellen [...] Entwicklungen sichtbar, welche auf ein verändertes Verhalten aktuell oder in naher Zukunft hindeuten, sind diese in der Gefahrenbeurteilung in Absprache mit der kantonalen Fachstelle zu berücksichtigen und im technischen Bericht auszuweisen.“ (Pflichtenheft Kt. Bern, Stand 2017)

Dass dies aktuell noch nicht immer umgesetzt wird, beschreiben Ragetti et al. [51] am Beispiel von Hochwasserschutzmassnahmen, die normalerweise ohne Einbezug des Klimawandels geplant werden. Dies wird als nicht sicher beurteilt. Erstens sagen Klimaprognosen substantielle Zunahmen der Niederschläge und Hochwasserereignisse vorher und zweitens sind Beobachtungsreihen keine verlässliche Basis mehr für die Prognose zukünftiger Ereignisse (siehe Abschnitt „Prozessketten und bisher unbekannte Ereignisgrössen“ in Kapitel 6.1.2). Gemäss [51] projizieren die Mehrzahl der Klimamodelle Extreme, welche die üblichen Sicherheitsfaktoren für das Bemessungshochwasser überschreiten. Entscheidungsträger sollten daher die möglichen Auswirkungen des Klimawandels bei der Planung von Hochwasserschutzmassnahmen in Berggebieten berücksichtigen.

Beim gesamten Naturgefahren- und Risikomanagement ist die Berücksichtigung des Klimawandels wichtig. Ein vorausschauendes Risikomanagement und eine Definition des Schutzzieles unter voller Berücksichtigung der räumlich-zeitlichen Aspekte sowie ein grundlegendes Verständnis der beteiligten Prozesse und Interaktionen ist gerade im Bereich der Naturgefahren von grosser Bedeutung. [17]

Die sich im Zuge des Klimawandels verändernden Risiken erfordern gemäss [47] ebenfalls Anpassungen von Bauvorschriften. Zum Beispiel gefährdet die erwartete Zunahme von Intensität und Häufigkeit von Extremwetterereignissen empfindliche Elemente der Gebäudehülle. Die mögliche Zunahme von Hochwassern, Starkniederschlägen, Stürmen und Hagelereignissen kann Bauten gefährden und zu grossen finanziellen Schäden führen. Daher sollten die heutigen Baunormen, welche auf Klimamittelwerten vergangener Beobachtungsperioden beruhen, sich verändernde klimatische Bedingungen berücksichtigen. [47]

6.3.4 Transparentes und systematisches Vorgehen bei der Gefahrenanalyse

Repetition der Erkenntnisse aus Kapitel 6.1



Es sollen Konzepte geschaffen werden für ein transparentes und systematisches Vorgehen bei der Gefahrenanalyse und der Planung von Schutzmassnahmen

National einheitliche, inhaltliche Vorgaben und starre Schemen für die Ausarbeitung von Schutzmassnahmen sind in Anbetracht der grossen Unsicherheiten und Dynamik des Klimawandels und seinen Auswirkungen auf die Naturgefahrenprozesse nicht sinnvoll (siehe Kapitel 6.3.1). Richtlinien für das methodische Vorgehen beim Einbezug des Klimawandels in die Gefahrenbeurteilung können aber durchaus einen Mehrwert bringen. Ein methodisch einheitliches, klar definiertes Vorgehen hätte insbesondere folgende Vorteile und Funktionen:

- Hilfestellung für Fachpersonen: Möglichkeiten, Empfehlungen und Herausforderungen für den Einbezug der komplexen Thematik des Klimawandels in die Gefahrenbeurteilung werden aufgezeigt
- Vollständigkeit: eine umfassende methodische und qualitativ gute Anleitung stellt sicher, dass an alle wesentlichen Punkte und Themen gedacht wird
- Transparenz: durch systematische und strukturierte Vorgaben zum Vorgehen wird die gebiets- und prozessspezifischen Gefahrenbeurteilung verständlich und nachvollziehbar
- Vergleichbarkeit: Dank einheitlichem, methodischem Vorgehen werden die gebiets- und prozessspezifischen Resultate vergleichbarer

Der Umgang mit dem Klimawandel ist komplex, sein Einbezug in die künftige Massnahmenplanung aber zentral. Zur Unterstützung von Planern und Behörden, aber auch für die Schaffung einer gewissen Transparenz und Nachvollziehbarkeit empfiehlt es sich ein, methodisch einheitliches Vorgehen auf Stufe Bund zu definieren.

6.3.5 Vorausschauend handeln und planen

Das Ausmass allfälliger Auswirkungen des Klimawandels ist stark davon abhängig, ob langfristig wirksame Entscheide (z.B. Waldwirtschaft, Ausbau von Infrastrukturanlagen, Wassermanagement, Definition von Gefahrenzonen) den Klimawandel Risiken berücksichtigen. [44]

Schutzbauten müssen in Anbetracht des sich ändernden Klimas bereits heute in Bezug auf ihre aktuelle und künftige Wirksamkeit geprüft werden. Mögliche Veränderungen während des Zeithorizonts der Massnahmen müssen berücksichtigt werden. [45] Eine lang- oder zumindest mittelfristige Sicht ist dabei wichtig. Auf jeden Fall muss die Planung von Massnahmen zum Schutz vor Naturgefahren über die kurzfristigen Finanzierungszyklen hinausgehen. [47] Die Schwierigkeit besteht meist darin, dass Massnahmen und ihre Wirkungen und damit Kosten und Nutzen zeitlich entkoppelt sind. [17] Langfristige Minderungen der Risiken sollten stärker gewichtet und kurzfristige finanzielle Einbussen in Kauf genommen werden. Teure nachträgliche Investitionen aufgrund veränderter Klimabedingungen lassen sich minimieren, indem die über den ganzen Lebenszyklus der Bauten zu erwartenden Klimaänderungen bereits beim Bau berücksichtigt werden. [17] Heute können wichtige Planungs- und Investitionsentscheide ohne grossen Zusatzaufwand so gefällt werden, dass die absehbaren Folgen des Klimawandels berücksichtigt sind. [44]

Die Akademie der Wissenschaften Schweiz (2006:14) erkennt: "Ein Verständnis der lokalen Auswirkungen ist der Schlüssel für eine kosteneffiziente Anpassung, die räumlich wie auch fachlich koordiniert zu erfolgen hat. Zur Priorisierung von Massnahmen ist eine detaillierte, gesamtwirtschaftliche Sicht auf die bereits anfallenden und künftig zu erwartenden Aufwände nötig." [17]

Die frühzeitige und proaktive Auseinandersetzung mit dem Klimawandel und seinen Folgen wird in den betreffenden Regionen als grosser Vorteil gesehen, da man für die künftigen Herausforderungen bestmöglich gewappnet ist. [22]

Aufgrund des dynamischen Systems und im Sinne der Nachhaltigkeit sollten Schutzmassnahmen bevorzugt werden, die sowohl unter den heutigen als auch den zukünftigen Klimabedingungen einen positiven Nutzen haben ("no-regret Massnahmen") und die neben ihrer Schutzwirkung vorzugsweise auch in anderen Bereichen positive Auswirkungen haben ("win-win Massnahmen"). [45], [46], [59]

6.3.6 Besonders hervorgehobene Massnahmen

Einige im Hinblick auf den Klimawandel besonders bedeutende Massnahmen zum Schutz vor Naturgefahren wurden in den untersuchten Studien speziell hervorgehoben.

Monitoring

In vielen der untersuchten Studien wurde auf die grosse Bedeutung des Monitorings hingewiesen (z.B. [14], [19], [22], [24] und viele weitere). Es besteht ein Konsens darüber, dass aufgrund der grossen Dynamik und Unsicherheit in Bezug auf die künftige Entwicklung die Naturgefahrensituation genau und sorgfältig überwacht werden sollte. Bedeutend sind Instrumente, um die klimatischen Veränderungen systematisch und langfristig beobachten und dokumentieren zu können, mit den heutigen Gefahren umzugehen und sich präventiv auf künftige Veränderungen vorbereiten zu können. Mit der systematischen Aufzeichnung, Beobachtung und Überwachung können die Veränderungen erfasst werden, die im Zusammenhang mit der Klimaänderung oft schleichend geschehen. Ausserdem können mit den Informationen aus dem Monitoring Grundlagen für die Definition von Massnahmenzielen bereitgestellt und die zeitliche Priorisierung und Planung der Massnahmen verbessert werden. [22] Je nach Ausgestaltung können Monitoringsysteme ebenfalls als Warnanlagen genutzt werden, mit welchen betroffene Kreise informiert und für angepasstes Verhalten sensibilisiert werden. [44]

Raumplanung

Mehrere Studien geben Informationen zur Raumplanung und deren Einfluss auf das künftige Risiko (z.B. [17], [18], [20], [43] und weitere). Neben den sich ändernden Naturgefahrenprozessen wird sich auch unser Kulturräum ändern. Auszugehen ist von einer Bevölkerungszunahme, einer intensiveren Nutzung des Raums und damit von steigendem Schadenpotential. Es zeigt sich, dass trotz den bestehenden Prognoseunsicherheiten auf mittel- und langfristige Sicht geplant werden sollte. In naher Zukunft wird die Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung vermutlich stärker ansteigen als die Magnitude und Frequenzen der Naturgefahrenprozesse (z.B. [18]).

Weitere umrahmende Massnahmen

IPCC beschreiben Anpassung an den Klimawandel als "den Prozess der Anpassung von natürlichen und gesellschaftlichen Systemen an tatsächliche und erwartete Veränderungen des Klimas sowie deren Folgen. Ziele der Anpassung sind die negativen Auswirkungen zu mindern und Vorteile zu nutzen." (IPCC 2014 in [17] S.144) In diesem Sinne sind nicht nur die in diesem Bericht explizit aufgeführten Massnahmentypen (baulich, raumplanerisch, organisatorisch und ingenieurbiologisch) für eine erfolgreiche Anpassung an den Klimawandel von Bedeutung, sondern in Bezug auf den Umgang mit gravitativen Naturgefahren ebenfalls Massnahmen aus den Bereichen Kommunikation und Organisation.

Der Information und Sensibilisierung der Bevölkerung auf die zu erwartenden Risiken wird beispielsweise grosses Gewicht beigemessen. Die Basis für Anpassungsmassnahmen ist, dass ein Bewusstsein für die Dringlichkeit der Problematik geschaffen wird. [17] Dies auch wenn der Klimawandel kurz- bis mittelfristig keine dramatischen Auswirkungen auf die Naturgefahrensituation hat. In diesem Fall ist es zwar verständlich, dass in der Öffentlichkeit und in der Politik kaum ein Handlungsbedarf wahrgenommen wird. Es ist aber wichtig das Bewusstsein für die mittel- und längerfristigen Folgen zu verbessern. [44] Bättig et al. (2011) zeigen z.B. auf, dass der Kommunikation von neuen oder bestehenden Risiken sowie von sich verändernden Naturgefahrenprozessen eine erhebliche Bedeutung zukommt. „Eine problemadäquate Informationspolitik der Behörden kann dazu führen, dass sich die Bevölkerung der bestehenden und neuen Gefahren

nicht nur bewusst wird, sondern auch bereit ist, zu handeln (z.B. freiwillige Schutzmassnahmen an Gebäuden oder korrektes Verhalten im Falle einer Evakuation).“ Organisatorische Abläufe und Informationsflüsse im Zusammenhang mit den Naturgefahren sollten auf jeden Fall geplant und Zuständigkeiten definiert werden. [22]

Die Akademie der Wissenschaften Schweiz (2016:88) fassen zusammen: "Um sich an diese Folgen des Klimawandels anpassen zu können, braucht es einen offenen Diskurs, eine partizipative Planung, integrative Denkansätze und eine Wissenschaft, die sich mit den veränderten Geo- und Ökosystemen beschäftigt." Dabei sind Anpassungsaktivitäten am wirksamsten, wenn sie Synergien nutzen und win-win-Situationen (Co-Benefits) mit anderen Aktivitäten herstellen können. Da die Auswahl möglicher Lösungen mit fortschreitender Zeit abnimmt ist ausserdem wichtig, dass die Anpassungsmassnahmen an den Klimawandel zeitnah diskutiert und umgesetzt werden. [17]

6.4 Anerkennung der bestehenden Strategie des Bundes

Die Schweiz ist wohl dasjenige Land in den europäischen Alpen, das im integralen Naturgefahrenmanagement am weitesten fortgeschritten ist. [47] Verschiedene Studien (z.B. [20], [46], [48]) bemerken, dass sich das integrale Risikomanagement bewährt hat. Auch die in Kapitel 6.3 aufgeführten Empfehlungen für die künftige Massnahmenplanung zeugen davon. Die bestehende Strategie zum Umgang mit Naturgefahren sollte demnach nicht gänzlich überarbeitet und verändert werden, sondern lediglich angepasst werden. Der Klimawandel ist ein sehr träger Prozess und seine Auswirkungen werden über viele Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte spürbar werden. [46]

6.5 Methodische Erkenntnisse

6.5.1 Umgang mit Unsicherheiten

In den untersuchten Studien wurden öfters Methoden für den Umgang mit bestehenden Unsicherheiten erwähnt. Es sind dies u.a.

- Die Kombination verschiedener Szenarien und Modelle
Unsicherheiten in Bezug auf Klimaprognosen werden oft durch die Analyse von Ensembles von Klimasimulationen abgeschätzt, die verschiedene Unsicherheitsquellen erfassen. ([33] und [39]) Die Akademie der Wissenschaften Schweiz (2016:37) beschreibt: "Der Beitrag der Modellunsicherheit kann abgeschätzt werden, indem Resultate von mehreren existierenden Klimamodellen verglichen werden und daraus eine Unsicherheit abgeschätzt wird. Die so geschätzte Unsicherheit ist eine Kombination der Modellunsicherheit und der natürlichen Variabilität. Die Unsicherheit auf Grund von natürlicher Variabilität allein lässt sich bestimmen, indem mehrere Simulationen mit demselben Modell und leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen durchgeführt werden." [17]
- Die Verlängerung von Messreihen
Mit Hilfe von stochastisch generierten Klimadaten können Messreihen verlängert werden und der Einfluss des Klimawandels auf die Beobachtungsdaten integriert werden. [18], [51]
- Der Einsatz von Fuzzy-Logic
In Anbetracht der grossen Unsicherheiten kann der Einbezug eines Fuzzy-Logic Ansatzes bei der Beurteilung künftiger Entwicklungen sinnvoll sein. [32] Anstelle von scharfen numerischen Grenzen, werden in der Fuzzy-Logic Übergangsbereiche betrachtet.
- Strukturiertes Vorgehen
Die strukturierte Fokussierung auf die relevanten Prozesse und Gebiete macht Zusammenhänge verständlich und Unsicherheiten handhabbar.

Egal welche Methode angewandt wird, besonders wichtig ist weiterhin die Offenlegung der bestehenden Unsicherheiten. Es ist wichtig die Unsicherheiten klar zu identifizieren und transparent zu dokumentieren. [50]

6.5.2 Räumliche "Hot Spots" der Forschung

Forschung wird oft immer wieder an den gleichen Orten durchgeführt. Hier sind Daten vorhanden, die weiterverwendet werden können. Andere Regionen dagegen werden in der Forschung kaum berücksichtigt. Wenn Grundlagen (z.B. Mess- oder Beobachtungsreihen) fehlen, ist das Gebiet für die Forschung meist von weniger grossem Interesse als Gebiete mit langen Datenreihen. (Bsp.[53]: Der Prozess Murgang wird im Mattertal untersucht, da hier eine gute Datengrundlage vorhanden ist). Gleichzeitig können keine weiterführenden Auswertungen von Naturgefahrenprozessen gemacht werden, wenn keine Grundlagedaten vorhanden sind. (z.B. wurde die Klimasensitivität von Rutschungen wegen fehlender Grundlagedaten nicht untersucht [30], siehe Abschnitt Wasser in Kapitel 5.1.2). Ein Grund für fehlende Studien ist oft das Fehlen von Grundlagedaten. [51]

Oft zeigt sich auch, dass sich die ökonomische Relevanz von Prozessen und Gebieten in der Forschungsaktivität widerspiegelt. Es werden insbesondere die Prozesse und Orte untersucht, wo Menschen und/oder Sachwerte betroffen sind.

6.5.3 Analysewürfel

Die untersuchten Studien wurden alle nach dem gleichen Schema erfasst und präsentiert (Kapitel 4). Die schematisch einheitlichen, einfach gehaltenen Graphiken mit welchen die drei Dimensionen des Analysewürfels Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp zu jeder Studie präsentiert werden, bieten für die einzelnen Studien eine gute Übersicht (z.B. Abbildung 13, links). Die Einordnung in die drei Analysedimensionen für die einzelnen Studien ist ein geeignetes Strukturierungsinstrument. Für die Synthese aber ist diese Darstellung weniger geeignet. Werden die Inhalte mehrerer Studien in der gleichen Graphik zusammengefasst, überlagern sich viele unterschiedliche Informationen, ohne dass eine Differenzierung möglich ist (Abbildung 13, rechts).

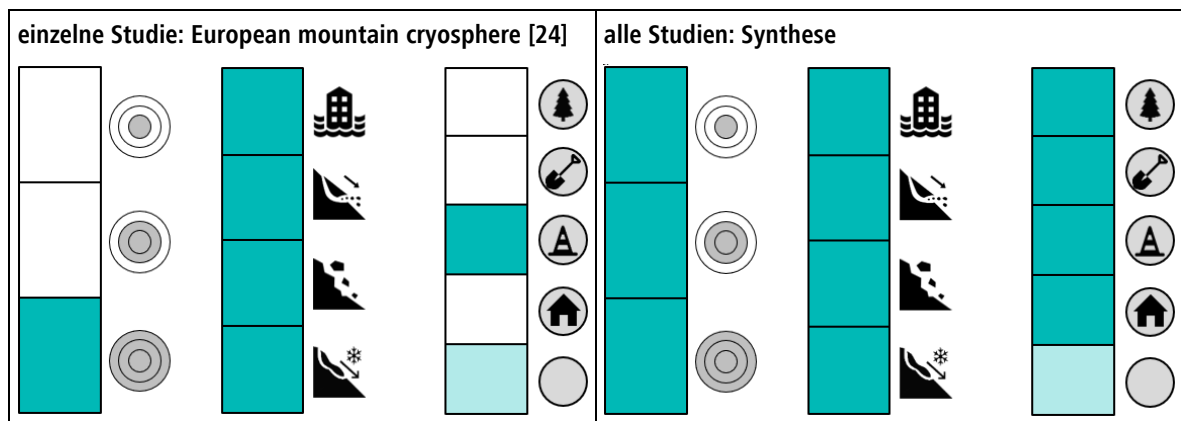


Abbildung 13: Graphische Präsentation der Analysedimensionen einer einzelnen Studie (links, Bsp. [24]) und aller untersuchten Studien (rechts).

Auf eine Darstellung der Studieninhalte im dreidimensionalen Analysewürfel, was ursprünglich angedacht war, wurde verzichtet. Der Mehrwert einer dreidimensionalen Darstellung gegenüber der zweidimensionalen ist beschränkt und die Komplexität der Abbildung würde sich aber deutlich vergrössern.

7 Ausblick – aktuelle und künftige Herausforderungen

7.1 Herausforderungen in Bezug auf den vorliegenden Bericht

Der Bericht soll einen systematischen Überblick über den aktuellen Stand des Wissens zu Naturgefahren und Klimawandel in der Schweiz ermöglichen und somit als Grundlage dienen für weiterführende Arbeiten und Untersuchungen.

Studien und Berichte, welche den Klimawandel und gravitative Naturgefahren zum Thema haben, liegen in sehr unterschiedlicher Auflösung sowohl räumlich (nationale vs. lokale Betrachtung) als auch konzeptionell (allgemeine Strategien vs. Analysen ganz konkreter Naturgefahrenprozesse) vor. Sie direkt miteinander zu vergleichen ist nur bedingt möglich und setzt eine starke Vereinfachung und Abstraktion voraus.

Die Kategorisierung der Literatur bzw. die Einordnung der Inhalte in die Dimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp ist immer eine Interpretation (siehe z.B. Beschreibung der Dimension Raum in Kapitel 2.1.1). Die Interpretationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen vorgenommen, sind aber nicht eindeutig und dementsprechend nur bedingt reproduzierbar.

Der vorliegende Bericht darf nicht als inhaltliches Nachschlagewerk oder Wissenssammlung genutzt oder verstanden werden. Er bietet einen systematischen, methodischen Überblick über die in den Studien der letzten Jahre behandelten Themen im Bereich Klimawandel und Naturgefahren in der Schweiz, nicht aber einen inhaltlichen Zusammenschluss des Wissensstands. Die aufgeführten inhaltlichen Erkenntnisse sind bewusst allgemein gehalten und keineswegs vollständig. Für weiterführende inhaltliche Informationen sind die Originalstudien oder Fachliteratur zu konsultieren.

Je nach Ziel der weiterführenden Untersuchungen lohnt es sich, den Fokus mehr auf die Inhalte der Studien zu legen als im vorliegenden Bericht, in welchem primär untersucht wurde welche Themen behandelt wurden oder nicht. Weiter würde es sich je nach Fragestellung lohnen, die Naturgefahrenprozesse differenzierter, also mit Einbezug weiterer Unterprozesse zu betrachten. Der Prozess Wasser z.B. beinhaltet Murgang, dynamisches Hochwasser, statisches Hochwasser und Oberflächenabfluss. Das sind vier Unterprozesse, die unterschiedlich auf den Klimawandel reagieren werden, für die unterschiedliche Anpassungsmassnahmen von Bedeutung sind und deren Zusammenhang mit dem Klimawandel in bisher sehr unterschiedlicher Tiefe erforscht wurde (siehe Kapitel 5.1.2).

Der in diesem Bericht präsentierte Stand des Wissens ist eine (unvollständige) Momentaufnahme. Damit der jeweils aktuellste Stand des Wissens zu Naturgefahren und Klimawandel in der Schweiz einsehbar ist, empfiehlt es sich zumindest die Literaturliste, allenfalls auch die Zusammenstellung der Studien in „Steckbriefen“ (analog Kapitel 4) weiterzuführen. Damit auch zukünftige relevante Studien zum Thema in der gleichen Art aufgenommen werden können, sollten Vorlagen und Hilfestellungen zur einheitlichen Erfassung generiert werden.

Eine Liste von möglichen weiteren zu betrachtenden Studien ist in der Referenzliste unter „weitere mögliche Studien von Relevanz“ aufgeführt.

7.2 Herausforderungen im allgemeinen Umgang mit dem Klimawandel

Anpassungsmassnahmen sind nur ein einzelnes Handlungsfeld beim Umgang mit dem Klimawandel und seinen Folgen. Und die künftigen Veränderungen der Naturgefahrenprozesse sind nur ein Teilaspekt der gesamten Auswirkungen des Klimawandels. Die Gesamtheit des Wandels und die grösseren Zusammenhänge dürfen nicht aus den Augen verloren werden, wie die folgenden beiden Abschnitte zeigen.

Massnahmen zur Anpassung und zur Ursachenbekämpfung

Der vorliegende Bericht liefert Informationen, die dem BAFU als Grundlage für die Ausarbeitung einer nationalen Strategie zum künftigen Umgang mit gravitativen Naturgefahren in der Schweiz dienen. Das heisst der Fokus des Berichts liegt auf Anpassungs- bzw. Schutzmassnahmen. Daneben sollten aber auch die Massnahmen zur Reduktion der Treibhausgase nicht in Vergessenheit geraten. Zusätzlich zum Umgang mit den Folgen des Klimawandels sollte dessen Ursache bekämpft werden. Die beiden Handlungsfelder sind in Abbildung 14 dargestellt und werden durch Bättig et al. (2011:2) wie folgt beschrieben:

- „Durch eine **Verminderung der Treibhausgasemissionen** kann die Stärke der zukünftigen Klimaänderung abgeschwächt werden. Dieser Prozess wird hauptsächlich auf internationaler und nationaler Ebene gesteuert.
- Mittels **Anpassungsmassnahmen** können sich Mensch und Natur an die Auswirkungen der bereits eingetretenen und weiter erwarteten Klimaänderung anpassen. Die Anpassungsmassnahmen werden vorwiegend auf lokaler Ebene definiert und umgesetzt.“ [22]

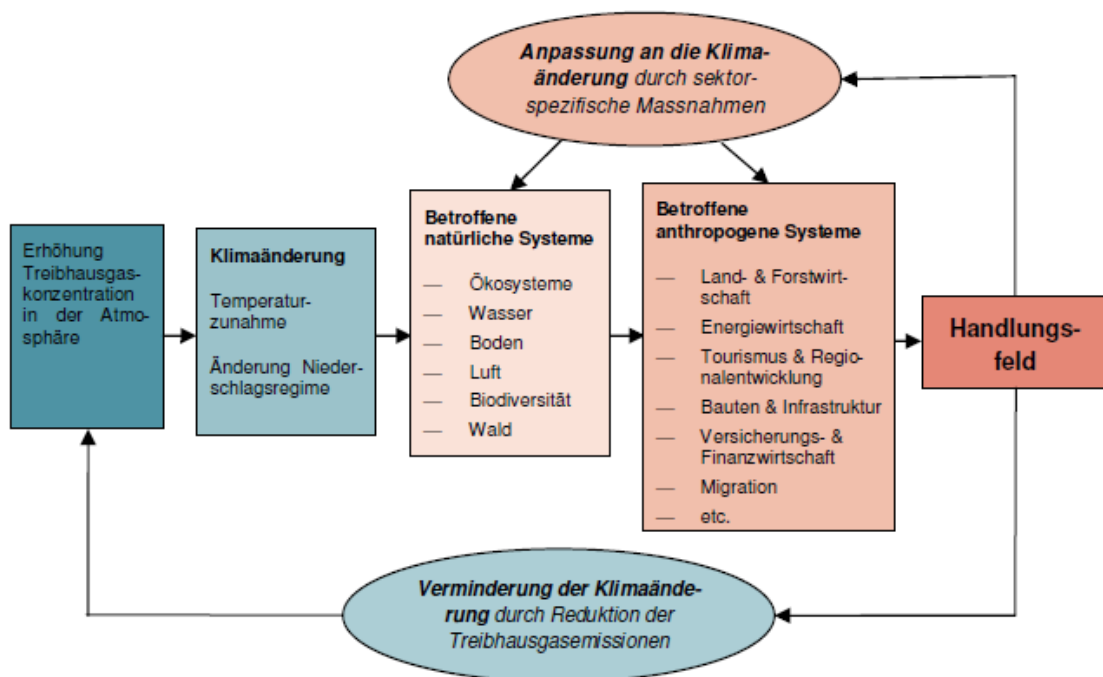


Abbildung 14: Wirkungsschema zu den beiden Handlungsfeldern „Verminderung der Klimaänderung“ und „Anpassung an die Klimaänderung“ (BAFU/econconcept in [23])

Ganzheitliche Betrachtung von Prozessen und Wirkungsketten

Die veränderten Naturgefahren beeinflussen nicht nur die lokale Gefahrensituation, sondern haben weitere Auswirkungen z.B. auf die lokale – regionale – am Ende allenfalls sogar nationale Ökonomie. Für einen funktionierenden Tourismus muss beispielsweise die Sicherheit von Menschen und Infrastrukturen langfristig erhalten und laufend verbessert werden. [22] Naturgefahren sollten daher nicht isoliert und nur aus dem Blick von Naturgefahrenexperten betrachtet werden, sondern im grösseren Zusammenhang und aus unterschiedlichen Blickwinkeln und Fachrichtungen. "Die Bearbeitung von Fragestellungen zur Anpassung an den Klimawandel profitiert stark davon, wenn unterschiedliche Erfahrungen und Kompetenzen verknüpft werden" (BAFU 2017:20). Die Einbindung von Wissenschaft und Forschung z.B. ermöglicht transdisziplinäres Arbeiten und kann die Übertragung vorhandener Forschungsergebnisse in die Praxis erleichtern. [20]

Die sich verändernden Naturgefahren sind nur ein einziger, kleiner Teilaspekt des Klimawandels. Stärker als die direkten Auswirkungen werden uns voraussichtlich die indirekten Auswirkungen der Klimaänderung treffen. „Die Schweiz ist eng verbunden mit der Weltwirtschaft, die in vielen Regionen grossen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Veränderungen ausgesetzt sein wird. Diese Veränderungen können global wie auch in der Schweiz zu grossen Fehlinvestitionen führen und die Bauten und Infrastrukturen wesentlich stärker treffen als die direkten Folgen der Erwärmung des Klimasystems" schreibt die Akademie der Wissenschaften Schweiz (2016:121).

7.3 Schlusswort

Unter anderem weil die Auswirkungen der Klimaänderungen in der Regel langsam ablaufen, sind sie allgemein noch wenig dokumentiert. Für die gravitativen Naturgefahren allerdings werden Ereignisdokumentationen und -auswertungen geführt sowie Szenarien entwickelt. Letzteres geschieht aber bisher meist ohne spezifische Berücksichtigung des Klimawandels. [48] Die in diesem Bericht aufgeführten Studien und die darin enthaltenen Informationen und Erkenntnisse können dafür genutzt werden diese Lücke zu schliessen. Bereits 2003 war laut OcCC „eine ausreichende Wissensgrundlage vorhanden, um Massnahmen gegen die Klimaänderung und zum Schutz vor Extremereignissen zu ergreifen.“ [45] Seitdem sind unsere Kenntnisse zum Zusammenhang zwischen Naturgefahren und Klimawandel grösser, die Datengrundlagen umfassender und die Klimaszenarien und Modelle präziser geworden. Die immer noch bestehenden z.T. grossen Unsicherheiten sollen nicht davor abschrecken, den Auswirkungen des Klimawandels zu begegnen und sie in der Massnahmenplanung zu berücksichtigen. Im Gegenteil: Es müssen Wege gefunden werden um mit den bestehenden Unsicherheiten umzugehen. Die Wege dorthin werden unterschiedlich sein. Auch die Regionen und die Auswirkungen des Klimawandels auf diese Regionen sind heterogen. Der Bund hat die Aufgabe eine Strategie für den Umgang mit den Herausforderungen des Klimawandels in Bezug auf die Naturgefahren in der Schweiz zu entwickeln. Der vorliegende Bericht soll dabei unterstützen.

Bern, 9. Juni 2020

geo7 AG

Referenzierte Dokumente

Klimagrundlagen

- [1] Beniston M. et al. (2007): Future extreme events in European climate: an exploration of regional regional, climate model projections. In: Clim Chage volume 81, S. 71 – 95.
- [2] Bosshard T., Kotlarski S., Ewen T., Arnold J., Pall P. und Schär C. (2011): Klimaszenarien für hydrologische Impaktstudien in der Schweiz. 14 S.
- [3] CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011. C2SM, MeteoSchweiz, ETH, NCCR Climate und OcCC (Hrsg.), Zürich. 88 S.
- [4] CH2018 (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, NCCS National Centre for Climate Services, Zürich. 271 S.
- [5] Climate Service Center (Hrsg.) (2012): Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgeforschung. CSC Report 6. Hamburg.
- [6] IPCC: Assessment reports (Sachstandsberichte) aus verschiedenen Jahren:
1990 – 1st Assessment Report
1995 – 2nd Assessment Report
2001 – 3rd Assessment Report
2007 – 4th Assessment Report
2013/2014 – 5th Assessment Report
zu finden unter <https://www.ipcc.ch/> (Stand, 16.03.2020)
- [7] IPCC (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- [8] MeteoSchweiz (2013): Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht. Fachbericht MeteoSchweiz Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, 243. 36 S.
- [9] Nogués-Bravo D. Araujo M. B., Errea M. P. und Martinez-Rica J. P. (2007): Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. In: Global Environment Change, Volume 17. S. 420 – 428.
- [10] PRUDENCE (2020): Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects. Zugriff über: <http://prudence.dmi.dk/>, (Stand: 23.03.2020)
- [11] Schädler B., Frei C., Grebner D. und Willi H.P. (2007): Grundlagen zum Klima. In: Wasser, Energie, Luft, 99. Jahrgang, Heft 1, S. 58 – 60.
- [12] WCRP (Hrsg.) (2020): WCRP Coupled Model Intercomparison Project (CMIP). World Climate Research Programme WCRP. Zugriff über: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip> (Stand: 30.03.2020)

Untersuchte Studien

- [13] AG NAGEF (2010): Fakten und Szenarien zum Klimawandel und Naturgefahren im Kanton Bern. Faltblatt. AG NAGEF Arbeitsgruppe Naturgefahren des Kanton Bern, Bern.
- [14] AG NAGEF (2015): Klimawandel und Naturgefahren – Veränderungen im Hochgebirge des Berner Oberlandes und ihre Folgen. AG NAGEF Arbeitsgruppe Naturgefahren des Kanton Bern, Bern.
- [15] ARGE GEOTEST AG und geo7 AG (2014): GHKperiGlazial. Pilot Kandertal – Phase I. Methodik-Bericht. Oberingenieurkreis I und BAFU Bundesamt für Umwelt Bern.
- [16] ARGE GEOTEST AG und geo7 AG (2015): GHKperiGlazial. Berner Oberland – Phase II. Schlussbericht Resultate. Oberingenieurkreis I und BAFU Bundesamt für Umwelt Bern.
- [17] Akademie der Wissenschaften Schweiz (2016): Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. Swiss Academic Reports 11 (5). 216 S.
- [18] BABS (Hrsg.) (2019): Starkniederschläge und Einsatzplanung von Schutz & Rettung Zürich – Studie von der geo7 AG im Rahmen des National Centre für Climate Services NCCS. Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), Bern.
- [19] BAFU (Hrsg.) (2012): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt "Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz" (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217. 76 S.
- [20] BAFU (Hrsg.) (2017): Impulse für eine klimaangepasste Schweiz. Erkenntnisse aus 31 Pilotprojekten zur Anpassung an den Klimawandel. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Info Nr. 1703. 96 S.
- [21] Ban N., Schmidli J. und Schär C. (2015): Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster? In: Geophysical Research Letter, Volume 42, S. 1165 – 1172.
- [22] Bättig M., Rom N. und Dettli R. (2011): Anpassung an die Klimaänderung im Berggebiet. Fallstudie Saastal. Econconcept AG, Zürich. 157 S.
- [23] Bebi P., Bugmann H., Lüscher P., Lange B. und Brang P. (2016): Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In: Pluess A.R., Augustin S. und Brang P. (Red.): Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptionsstrategien. BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf. Haupt Bern, Stuttgart, Wien. S.269 – 285.
- [24] Beniston M. et al. (2018): The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. In: The Cryosphere, Volume 12, S. 759 – 794.
- [25] Brunner M. I., Farinotti D., Zekollari H., Huss M. und Zappa M. (2019): Future shifts in extreme flow regimes in Alpine regions. In: Hydrology and Earth System Science, Volume 23, S. 4471 – 4489.
- [26] Einhorn B. et al. (2015): Climate change and Natural Hazards in the Alps: Observed and potential impacts on physical and socio-economic systems. In: Journal of Alpine Research, Volume 103-2.
- [27] Farinotti D., Usselman S., Huss M., Bauder A. und Funk M. (2011): Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. Hydrological Processes, doi: 10/1002/hyp.8276
- [28] Frei P., Kotlarski S., Liniger M. A. und Schär C. (2018): Future snowfall in the Alps: projections based on the EURO-CORDEX regional climate models In: The Cryosphere, Volume 12, S. 1 – 24.
- [29] geo7 AG (2015a): Klimasensitivität Naturgefahren. Teil 1: Methodenbericht. BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern.

- [30] geo7 AG (2015b): Klimasensitivität Naturgefahren. Teil 2: Resultate. BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [31] geo7 AG (2017): Gefahrenbeurteilung Fellbach, Prozess Wasser. Technischer Bericht.
- [32] geo7 AG (2019): Klimasensitivität Naturgefahren. Fachbericht Pilotprojekt Val d'Hérens. BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [33] Gobiet A., Kotlarski S., Beniston M. Heinrich G., Rajczak J. und Stoffel M. (2014): 21st century climate change in the European Alps. In: Science of The Total Environment. Volume 493, S. 1138 – 1151.
- [34] Hänggi P., Bosshard T. und Weingartner R. (2011): Swiss discharge regimes in a changing climate. In: Hänggi P.: Auswirkungen der hydroklimatischen Variabilität auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz. Dissertation Universität Bern, Bern. S. 77 – 100.
- [35] Horton P., Schläfli B., Mezghani A., Hingray B. und Musy A. (2006): Assessment of climate-change impacts on alpine discharge regimes with climate model uncertainty. In: Hydrol. Process. Vol. 20, S. 2091 – 2109.
- [36] Kenner R. und Phillips M. (2017a): Fels- und Bergstürze in Permafrost Gebieten: Einflussfaktoren, Auslösemechanismen und Schlussfolgerungen für die Praxis. Schlussbericht ARGE Alp Projekt. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF.
- [37] Kenner R. und Phillips M. (2017b): Hinweise für die Praxis zum Umgang mit Felsinstabilitäten im Permafrost. Erkenntnisse aus dem ARGE Alp Projekt "Einfluss von Permafrost auf Berg- und Felsstürze". WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF.
- [38] KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz. KOHS Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband. In: Wasser, Energie, Luft, 99. Jahrgang, Heft 1, S. 55 – 57.
- [39] Köplin N. (2012): Hydrological impacts of climate change in Switzerland during the 21st century. Inauguraldissertation, Philosophisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Bern, Bern.
- [40] Marmy A. et al. (2016): Semi-automated calibration method for modelling of mountain permafrost evolution in Switzerland. In: The Cryosphere, Volume 10, S. 2693 – 2719.
- [41] Marty C., Phillips M., Lehning M., Wilhelm C. und Bauder A. (2009): Klimaänderung und Naturgefahren in Graubünden. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen. Volume 160, S. 201 – 209.
- [42] Messenzehl K., Meyer H., Otto J. C., Hoffmann T. und Dikau, R. (2017): Regional-scale controls on the spatial activity of rockfalls (Turtmann valley, Swiss Alps) – a multivariate modeling approach. In: Geomorphology, Volume 287, S. 29 – 45.
- [43] MeteoSchweiz und PLANAT (Hrsg.) (2007): Klimaänderung und Naturkatastrophen in der Schweiz. MeteoSchweiz Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie und PLANAT Nationale Plattform Naturgefahren, 4 S.
- [44] Nauser M. (2016): Das Wallis angesichts des Klimawandels – Auswirkungen und Anpassungsoptionen in den Bereichen Wasserbewirtschaftung und Naturgefahren (Synthesepapier). Dienststelle für Wald und Landschaft, Sektion Naturgefahren, Sion.
- [45] OcCC (Hrsg.) (2003): Extremereignisse und Klimaänderung. OcCC Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, Bern. 88 S.
- [46] OcCC und ProClim (Hrsg.) (2007). Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. OcCC Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung und ProClim Forum für Klima und Global Change, Bern. 168 S.

- [47] OECD (Hrsg.) (2007): Climate Change in the European Alps - adapting winter tourism and natural hazards management. OECD Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, 127 S.
- [48] Perroud M. und Bader S. (2013): Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zur Ursache, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 1308. BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern und MeteoSchweiz Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, Zürich. 86 S.
- [49] Pielmeier C., Techel F., Marty C. und Stucki T. (2013): Wet snow avalanche activity in the Swiss Alps – trend analysis for mid-winter season. In: Proceedings of the International Snow Science Workshop, Grenoble and Chamonix, S. 1240 – 1246.
- [50] Prudent-Richard G., Gillet M., Vengeon J. und Descotes-Genon S. (2008): Changements climatiques dans les Alpes : impacts et risques naturels. Technischer Bericht. ONERC Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique. 99 S.
- [51] Ragetti S., Tong X., Zhang G., Wand H., Zhang P. und Stähli M. (2020): Climate change impacts on summer flood frequencies in two mountainous catchments in China and Switzerland. In: Hydrology Research.
- [52] Scherrer S.C., Fischer E. M., Posselt R., Liniger M. A., Croci-Maspoli M. und Knutti R. (2016): Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. In: Journal of Geophysical Research: Atmosphere. Volume 121. S. 2626 – 2637.
- [53] Stoffel M., Tiranti D. und Huggel C. (2014): Climate change impacts on mass movements – Case studies from the European Alps. In: Science of The Total Environment, Volume 493, S. 1255 – 1266.
- [54] Zekollari H., Huss M. und Farinotti D. (2019): Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. In: Cryosphere, Volume 13, S. 1125 – 1146.

Weitere mögliche Studien von Relevanz

- [55] BAFU (2013 – ?): Informationen zu und Publikationen im Rahmen des Projekts "Anpassung an den Klimawandel" des BAFU. Zu finden u.a. unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/anpassung-an-den-klimawandel/pilotprogramm-anpassung-an-den-klimawandel.html> (Stand: 11.02.2020)
- [56] BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) (2008): Klimawandel in den Alpen. Fakten – Folgen – Anpassungen. 91.S.
- [57] Hydro CH2018 und dazugehörige Einzelpublikationen (noch nicht veröffentlicht). Projektinformationen zu finden unter: <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/das-nccs/themenschwerpunkte/hydro-ch2018/hydro-ch2018-forschungsprojekte.html> (Stand: 02.03.2020)
- [58] EXAR – Gefahrengrundlagen für Extremhochwasser an Aare und Rhein (noch nicht veröffentlicht). Projektinformationen zu finden unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/dossiers/grossprojekte-hochwasserschutz/ Gefahrengrundlagen-fuer-extremhochwasser-an-aare-und-rhein--exar.html> (Stand: 02.03.2020)
- [59] Köllner P., Gross, C., Schäppi B., Füssler J., Lerch, J. und Nauser M. (2017): Klimabedingte Risiken und Chancen. Eine schweizweite Synthese. BAFU Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1706: 148 S.
- [60] NCCS (2020): Detaillierte Information zum Pilotprogramm zur Anpassung an den Klimawandel mit Informationen zu den einzelnen abgeschlossenen und laufenden

Projekten: <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/massnahmen/pak.html> (Stand: 02.03.2020)

- [61] Publikationen im Rahmen des Projekts ClimChAlp – Climate Change Impacts and Adaption Strategies in the Alpine Space, zu finden unter <http://www.alpine-space.org/2000-2006/temp-results115.html> (Stand, 10.02.2020), z.B. ClimChAlp-Partnerschaft (Hrsg.) (2008): Klimawandel, Auswirkungen und Anpassungsstrategien im Alpenraum. Strategisches Interreg-III-B-Alpenraum-Projekt. Common Strategic Paper. 31. S.
- [62] Eine Online Datenbank mit Publikationen rund um die Auswirkungen des Klimawandels in der Schweiz und im nahen Ausland ist <http://swidchi.epfl.ch/> (Stand: 11.02.2020)

Weitere betrachtete Grundlagen

- [63] BAFU (2017): Geobasisdaten des Umweltrechts – Datenmodell Gefahrenkartierung. Identifikator 166.1, Version 1.2. Stand: 23.06.2017
- [64] BAFU (2020): Naturgefahren: Massnahmen. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/fachinformationen/umgang-mit-naturgefahren/naturgefahren--massnahmen.html> (Stand: 24.02.2020)
- [65] Fischer A. (2020): Umgang mit zukünftigen Extremen aus den Klimaszenarien CH2018 – Empfehlungen für die Praxis. Referat anlässlich des FAN Forums 2020 in Solothurn. MeteoSchweiz. (28.02.2020)
- [66] NCCS (Hrsg.) 2018: CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich. Zugriff über Webatlas <https://www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/materialien-und-daten/daten/ch2018-webatlas.html> (Stand: 02.03.2020)
- [67] PLANAT (2018): Umgang mit Risiken aus Naturgefahren, Strategie 2018 <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/53006.pdf> (Stand: 01.03.2020)
- [68] Schadenlawinendatenbank SLF: <https://www.slf.ch/de/services-und-produkte/daten-und-monitoring/schadenlawinendatenbank.html> (Stand: 01.03.2020)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Klimaindikatoren, Naturraum und gravitativen Naturgefahren.....	2
Abbildung 2: Analysewürfel und seine Dimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp.....	3
Abbildung 3: Graphische Darstellung der drei untersuchten Dimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp.	5
Abbildung 4: Anzahl untersuchte Studien nach Erscheinungsjahr.....	8
Abbildung 5: Vergleich GCM und RCM am Beispiel von EURO-CORDEX.....	11
Abbildung 6: Klimazukunft der Schweiz vereinfacht dargestellt anhand vier fiktiver Personen, die von den vier Hauptveränderungen betroffen sind. [66].....	14
Abbildung 7: Überlagerung der drei Analysedimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp aus allen Steckbriefen (total 31 Studien).....	54
Abbildung 8: Die betrachtete Raumskala korreliert mit der Anzahl betrachte Studien, der Abdeckung des Raums und dem Detaillierungsgrad der Aussagen.....	55
Abbildung 9: Überlagerung der drei Analysedimensionen Raum, Naturgefahrenprozess und Massnahmentyp aus den Steckbriefen der als zentral bewerteten Studien. (Relevanz 1, total 12 Studien).....	59
Abbildung 10: Vereinfachte Darstellung der in den untersuchten Studien behandelte Inhalte und den sich daraus ergebenden Lücken.....	60
Abbildung 11: Temperaturprognose für die Schweizer Alpen [66].....	65
Abbildung 12: Schematische Darstellung verschiedener Unsicherheitsquellen bei der Analyse der Auswirkungen des Klimawandels (OECD 2003 in [50])	73
Abbildung 13: Graphische Präsentation der Analysedimensionen einer einzelnen Studie (links, Bsp. [24]) und aller untersuchten Studien (rechts).	79
Abbildung 14: Wirkungsschema zu den beiden Handlungsfeldern „Verminderung der Klimaänderung“ und „Anpassung an die Klimaänderung“ (BAFU/econconcept in [23])	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Masstabsebenen der Dimension Raum.	3
Tabelle 2:	Betrachtete Naturgefahren mit Zuordnung der jeweiligen Unterprozesse.	4
Tabelle 3:	Unterscheidung verschiedener Massnahmentypen.	4
Tabelle 4:	Graphische Darstellung des Informationsgehalts bzgl. Naturgefahrenprozess.	6
Tabelle 5:	Graphische Darstellung des Informationsgehalts bzgl. Raum und Massnahmentyp.	6
Tabelle 6:	Fazit – Beurteilung der Gültigkeit der jeweiligen Studie für Strategie- oder Planungszwecke.	6
Tabelle 7:	Graphische Darstellung der Beurteilung des Nutzens der jeweiligen Studie für Strategie- bzw. Planungszwecke.	7
Tabelle 8:	Einordnung der Studien in Bezug auf ihre Relevanz.	7
Tabelle 9:	Emissionsszenarien – Representative Concentration Pathways, RCP	9
Tabelle 10:	Beschreibung der Projekte PRUDENCE, ENSEMBLES und EURO-CORDEX, welche Klimaszenarien für Europa liefern.	11
Tabelle 11:	Vergleich der drei Generationen von Klimaszenarien für die Schweiz CH2018, CH2011 und CH2007 [4]	12
Tabelle 12:	Überblick über die Analysedimensionen der als zentral bewerteten Studien	61

Anhang Studien zum allgemeinen Impakt des Klimawandels in der Schweiz

Im Folgenden sind ausgewählte Studien aufgeführt, die wesentliche neue Erkenntnisse in Bezug auf den Impakt des Klimawandels auf den Naturraum oder methodische Erkenntnisse liefern, die aber keine direkte Aussage zu gravitativen Naturgefahrenprozessen ermöglichen.

Farinotti et al. (2011): Runoff evolution in the Swiss Alps: projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. [27]

Anhand von neun hochalpinen Einzugsgebieten in den Schweizer Alpen wird die erwartete Abflussänderung und Gletscherentwicklung bis Ende des 21. Jahrhunderts untersucht. Die Ergebnisse basieren auf Modellierungen mit dem Modell GERM (Glacier Evolution Runoff Model) und Szenarien des ENSEMBLES Projekts. Die grössten Veränderungen werden in heute vergletscherten Einzugsgebieten erwartet. Hier lässt sich ein generelles Muster der Abflussveränderung erkennen: nach einer Anfangsphase mit erhöhten jährlichen Abflüssen, deren Maximum vor 2050 erwartet wird, nimmt die Abflussmenge stetig ab. Ein Übergang der Regimetypen von glazialen und glazial-nivalen Einzugsgebieten hin zu nivalen Regimen wird prognostiziert. Es wird zudem erwartet, dass die jährlichen Maximalabflüsse früher im Jahr auftreten als heute und der Beitrag der Schnee- und Eisschmelze zum jährlichen Abfluss bis zum Jahr 2100 um 15 – 25 % sinken wird. Generelle Aussagen zu absoluten Abflussschwankungen sind nicht zuverlässig, da diese stark Einzugsgebietsabhängig sind. Neben den inhaltlichen Erkenntnissen fokussiert die Studie auf die Abschätzung von Unsicherheiten aufgrund der Klimaentwicklung.

Hänggi et al. (2011): Swiss discharge regimes in a changing climate [34]

Vergangene und für den Zeitraum 2021 – 2050 prognostizierte Veränderungen von typischen Abflussregimen der Schweiz werden untersucht und als Teil der Dissertation zu den "Auswirkungen der hydroklimatischen Variabilität auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz" präsentiert. Es wird deutlich, dass insbesondere die Flüsse, deren Einzugsgebiet in vergletscherten Regionen liegt oder deren Abflussverhalten von Schnee dominiert wird, sensibel auf den Klimawandel reagieren. Die im Hydrologischen Atlas der Schweiz vorgenommene Klassifizierung in Regimetypen hat aktuell noch Gültigkeit, muss aber auch künftig weiter überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Neben der Untersuchung der Abflussveränderung, wie sie z.B. auch in [25], [39] und [35] vorgenommen wurde, sind gemäss [34] insbesondere auch die sich daraus ergebenden Herausforderungen in Bezug auf Sedimenttransport, Ökologie und ökonomischen Umgang mit der Ressource Wasser zu beachten.

Frei et al. (2018): Future snowfall in the Alps: projections based on the EURO-CORDEX regional climate models [28]

Auf der Basis von regionalen Klimamodellen und zwei unterschiedlichen Emissions-Szenarien wird die bis Ende des 21. Jh. erwartete Veränderung von Schneefällen in den europäischen Alpen untersucht. Erstmals wurde eine Methode angewandt, die zwischen Regen und Schneefall unterscheidet. Die Ergebnisse zeigen ausgeprägte Veränderungen des alpinen Schneefallklimas mit erheblichen Schneerückgängen bei niedrigen und mittleren Höhenlagen, aber auch Schneefallanstiegen bei hohen Höhenlagen im Mittwinter. Es wird erwartet, dass die veränderten Schneebedingungen auch das Hochwasserpotential beeinflussen: In tiefen Lagen erhöht sich das Hochwasserpotential aufgrund der Zunahme der Winterniederschläge mit kleineren Schneefallanteilen (aufgrund der ebenfalls zunehmenden Temperatur). Die Pufferwirkung der Schneedecke (allmähliche Abgabe von Schmelzwasser) geht insbesondere in tiefen Lagen bis Ende des 21. Jh. verloren, so dass starke Niederschläge direkt in Bäche und Flüsse gelangen. Unsicherheiten in Bezug auf Intensität und Häufigkeit sowie räumliche Verteilung von Schneefällen bleiben nach wie vor bestehen. Auch Aussagen zu sehr seltenen Ereignissen sind keine möglich. Es wird aufgezeigt, dass die Prognose künftiger Schneefalländerungen bedeutend sind für langfristige

Planungs- und Anpassungsmassnahmen. Mit der Studie können die mit dem Schneefall verbundenen sozioökonomischen Auswirkungen und Kosten bewertet werden.

Marmy et al. (2016): Semi-automated calibration method for modelling of mountain permafrost evolution in Switzerland [40]

Die Entwicklung des Permafrosts im Laufe des Klimawandels und der Zusammenhang mit künftigen Naturgefahrenprozessen bzw. deren Standorte sind für die Gesellschaft von grosser Bedeutung. Numerische Permafrostmodelle sind die einzige Möglichkeit um die künftige Permafrostentwicklung vorherzusagen. Aufgrund der grossen Komplexität des Prozesses Permafrost und der Heterogenität des alpinen Terrains müssen diese Modelle sorgfältig kalibriert und auf der lokalen Ebene (Bohrlöcher) überprüft werden. Eine halbautomatische Kalibrierungsmethode für Permafrostmodelle wird vorgestellt, welche grossflächigere Modellierungen ermöglichen soll. Es wird aufgezeigt, dass der Prozess Permafrost ein hochkomplexer Prozess ist, der noch nicht vollständig verstanden und erforscht wurde. Um diese Lücke zu schliessen, ist der Bereitstellung von langfristigen und qualitativ guten Messdaten ein grosses Gewicht beizumessen.

Zekollari et al. (2019): Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble [54]

Die künftige Entwicklung der Gletscher ist unter anderem bedeutend für den Wasserkreislauf, die Nutzung der Wasserkraft und den Tourismus in den Alpen. Die Gletscherentwicklung wurde bisher mit Hilfe verschiedener Parametrisierungen modelliert. Zekollari et al. [54] integrieren neben der oberflächlichen Massenbilanz erstmals auch den Eisfluss in ein regionales Prognosemodell. Mit Integration des Eisflusses können die Gletscherdynamik sowie die treibenden Mechanismen hinter der künftigen Gletscherentwicklung besser verstanden werden. Zekollari et al. [54] geben eine quantitative Prognose wie stark Fläche und Volumen der Gletscher in den europäischen Alpen bis 2050 resp. 2100 abnehmen werden. Ausserdem wird aufgezeigt, dass die den Prognosen zugrunde liegenden Klimaszenarien bedeutend grösseren Einfluss auf die Prognoseergebnisse haben als die Wahl der Modellparameter.