

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	EASICLIM
Langtitel:	Eastern Alpine Slope Instabilities under Climate Change
Zitiervorschlag:	Eastern Alpine Slope Instabilities under Climate Change
Programm inkl. Jahr:	ACRP 9th Call for Proposals
Dauer:	01.04.2017 bis 31.12.2019
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Karl-Franzens Universität Graz Douglas Maraun
Kontaktperson Name:	Douglas Maraun
Kontaktperson Adresse:	Wegener Center für Globalen Wandel Brandhofgasse 5, A-8010 Graz
Kontaktperson Telefon:	+43 316 380 8448
Kontaktperson E-Mail:	douglas.maraun@uni-graz.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Joanneum Research (Steiermark) AIT (Niederösterreich) Friederich Schiller Universität Jena (Deutschland)
Schlagwörter:	Klimawandel, Hangrutschungen, Steiermark, Feldbach
Projektgesamtkosten:	248.313 €
Fördersumme:	249.954 €
Klimafonds-Nr:	KR16AC0K13160
Erstellt am:	31.05.2020

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Hintergrund und Ziele: Rutschungen sind eine relevante Naturgefahr für Österreichs Bevölkerung, Siedlungen und Infrastruktur. Die wichtigsten natürlichen Auslöser von Hangrutschungen in Österreich sind Starkniederschlagsereignisse und schnelle Schneeschmelze. Die Südoststeiermark ist aufgrund der geologischen und klimatischen Situation bereits seit langem als ein für Rutschungen besonders anfälliges Gebiet bekannt. Im Juni 2009 war die Südoststeiermark besonders stark von Hangrutschungen betroffen, als ein abgeschnürtes Höhentief über der Adria im Bezirk Feldbach über 3000 Hangrutschungen ausgelöst hat. Im September 2014 gab es ein ähnliches, wenngleich weniger starkes Ereignis. Vor diesem Hintergrund hat das EASICLIM Projekt folgende Forschungsfragen untersucht:

1. In welchem Ausmaß kann die Stärke der Hangrutschungsereignisse von 2009 und 2014 auf den Klimawandel zurückgeführt werden?
2. Wie stark würden solche Ereignisse bei einem weiter voranschreitenden Klimawandel ausgeprägt sein? Und könnte das Hangrutschungsrisiko durch Aufforstung verringert werden?
3. Wie treffen Menschen in Risikogebieten Vorsorge bezüglich zukünftiger Hangrutschungen, und wie hängen die Risikowahrnehmung dieser Menschen und ihre Vorsorge-Absichten von verschiedenen Szenarien zukünftiger Hangrutschungsgefährdung ab?

Um die Projektziele zu erreichen, wurde ein hochauflösender Modellierungsansatz mit einem statistischen Modell der Hangrutschungsgefährdung kombiniert. Ein regionales Klimamodell (RCM) wurde genutzt, um das beobachtete meteorologische Ereignis unter den tatsächlichen Bedingungen sowie unter kontrafaktischen vergangenen (1°C kälter) und wärmeren Bedingungen zu simulieren. Für die wärmeren Bedingungen wurden sowohl eine ungebremsste Erwärmung ohne Klimaschutzmaßnahmen angenommen als auch das Ziel, die globale Erwärmung auf 1.5°C relativ zum vorindustriellen Klima zu begrenzen, wie im Pariser Klimaabkommen festgelegt. Die Simulationen der Ereignisse wurden ergänzt durch eine Analyse von Änderungen im Auftreten von globalen Klimamodellen (GCMs) simulierten großskaligen Wetterlagen, die ähnliche Extremereignisse auslösen. Das statistische Gefährdungsmodell wurde kalibriert, um den statistischen Einfluss von beobachteten Umweltgrößen wie Niederschlag und Landbedeckung auf das beobachtete Auftreten der Hangrutschungen während der 2009er und 2014er Ereignisse abzubilden. Um den Einfluss von Klimawandel und Landnutzungsänderungen auf die Hangrutschungsgefährdung zu quantifizieren, wurde das statistische Gefährdungsmodell sowohl mit den RCM Simulationen als auch mit realistischen Szenarien zukünftiger Landbedeckung angetrieben. Der naturwissenschaftliche Teil des Projekts wurde durch eine

Haushaltsbefragung komplementiert, um die Anpassungsbereitschaft privater Haushalte zu untersuchen, sowie um ein Kunstprojekt.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen: Es wurde festgestellt, dass der Klimawandel nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Häufigkeit von Wetterereignissen hat, die anhaltende Niederschläge in Österreich hervorrufen. Hingegen wird die Intensität von Niederschlägen während solcher Ereignisse deutlich vom Klimawandel beeinflusst. In einem 1°C kälteren Klima wäre das Ereignis sehr viel weniger heftig gewesen. Je nach betrachtetem Niederschlagsindikator und betrachteter (unsicherer) regionaler Ausprägung des Klimawandels, wären die Niederschläge zwischen 15% und 27% weniger intensiv gewesen. Kurze heftige Niederschläge zeigten sich viel stärker durch den Klimawandel beeinflusst als die gesamten Niederschläge während des Ereignisses. Ähnliche Ergebnisse wurden für ein wärmeres zukünftiges Klima gefunden. In einem Worst-Case Szenario ohne Klimaschutzmaßnahmen, das einer globalen Erwärmung von etwa 4°C entspricht, könnten die Niederschlagsintensitäten um 20% bis 92% steigen, je nach Indikator und Ausprägung. Eine Begrenzung des Klimawandels auf 1.5°C relativ zum vorindustriellen Klima würde die Intensivierung auf nur 3% bis 10% reduzieren. Infolgedessen wird auch die Hangrutschungsgefährdung stark vom Klimawandel beeinflusst. In einem 1°C kälteren Klima wäre die stark gefährdete Fläche zwischen 5% und 14% kleiner. In einem 4°C wärmeren Klima hingegen könnte die Fläche hoher Gefährdung um 126% bis 135% größer werden. Die Langnutzungsänderungen in der Region werden als klein angenommen und reduzieren die Hangrutschungsgefährdung nur marginal. Eine Begrenzung des Klimawandels auf eine Erwärmung von 1.5°C würde Änderungen in der Hangrutschungsgefährdung im wesentlichen eliminieren. Ähnliche Resultate wurden für das 2014er Ereignis gefunden.

Eine standardisierte Haushaltsbefragung, durchgeführt im Gemeindegebiet Feldbach, liefert detaillierte Einblicke hinsichtlich der Bereitschaft zur Eigenvorsorge und deren Einflussfaktoren. Weitere Themen in der Befragung umfassten Risikobewusstsein, die Rolle des Klimawandels, Vertrauen in bestehende Maßnahmen, Schutzverantwortung und Informationsbedürfnis. Die weit verbreitete Annahme, dass Risikobewusstsein zu erhöhtem Schutzhandeln führt, kann nicht bestätigt werden. Als besonders einflussreiche Faktoren haben sich hingegen wahrgenommene Maßnahmenwirksamkeit und Selbstwirksamkeit – das Vertrauen in die eigenen Fähigkeiten, Maßnahmen erfolgreich umsetzen zu können – herausgestellt. Die Bereitschaft zur Eigenvorsorge hängt also nicht von der Höhe des Risikobewusstseins ab, sondern von subjektiven Maßnahmeneinschätzungen und dem Vertrauen in die eigenen Umsetzungsfähigkeiten. Anstatt mit Angstappellen das Risikobewusstsein in der lokalen Bevölkerung zu erhöhen, sollten betroffene Haushalte mittels „Informationsappellen“ gezielt über mögliche Schutzmaßnahmen und deren Wirksamkeit informiert werden. Ebenso gilt es, das Vertrauen von Haushalten in ihre eigenen Fähigkeiten zu stärken. Die Ergebnisse der standardisierten Befragung liefern wertvolle Ansatzpunkte für eine zielgerichtete Stärkung der Eigenvorsorge und eines integrierten lokalen Risikomanagements.

2 Executive Summary

Background and Objectives

Landslides are slope instabilities and a major threat to Austria's population, urban settlements, infrastructure and environment. The main natural triggers for landslides in Austria are heavy rainfall events and rapid snow melting. Whereas short and heavy rainfall events mainly trigger shallow landslides, long-lasting rainfall events trigger both shallow and deep-seated landslides. The prealpine study area in the southeastern part of Styria is susceptible to landslides because of its geological conditions, its land-cover and climate.

A particularly extreme event happened in June 2009, when a persistent cut-off low over the Adriatic Sea caused more than 3000 landslides in the Feldbach region. A similar, but less severe event happened in 2014.

Against this background, the EASICLIM project addressed three research questions:

1. To what extent can the severity of the 2009 and 2014 events be attributed to climate change?
2. How would such events manifest in a warmer future climate, both in terms of severity and occurrence? Could the associated impacts be reduced by pro-active land-use management?
3. How do people at risk of landslides prepare for future landslides, and how do their risk perceptions and adaptation intentions vary between different future landslide scenarios?

To achieve the project objectives, we combined a high resolution climate modelling approach with a statistical model for landslide susceptibility. A regional climate model was used to simulate the observed meteorological event under actual observed conditions as well as under counterfactual past (1°C cooler) and warmer conditions. For the warmer conditions, we considered both a continued warming without climate mitigation as well as the target to limit global warming to 1.5°C compared to pre-industrial climate, as specified in the Paris agreement. The event simulations were complemented by an analysis of changes in the occurrence of large-scale weather types leading to such events, as simulated by global climate models (GCM). The statistical landslide model was calibrated to represent the statistical influence of observed environmental conditions, including precipitation and land-use/land-cover, on the observed landslide occurrences during the 2009 and 2014 events. To assess the influence of climate-change and land-use land-cover changes on landslide susceptibility, the RCM simulations as well as a realistic scenario of land-use land-cover changes were fed into the statistical landslide model. The natural science part of the project was complemented by a survey to understand the preparedness of the affected population and by an art project.

Results and Conclusions

It was found that climate change had a negligible effect on the occurrence of weather types causing persistent heavy precipitation over Austria. Instead, the intensity of precipitation falling in such events is substantially affected by climate change. In a 1°C cooler climate, the same event would have been much less severe. Depending on the precipitation indicator and the (still uncertain) strength of the climate response, precipitation would have been between 15% and 27% less intense. Overall, short-term heavy precipitation was found to respond much stronger than the precipitation falling during the whole event. Similar effects were found for a warmer future climate. In a worst-case scenario without mitigation efforts, corresponding to a further global warming of 4°C, precipitation intensities could increase between 20% and 92%, again depending on the indicator and the climate response. Limiting global warming to 1.5°C compared to pre-industrial climate (i.e., to a future warming of only 0.5°C) would reduce the intensification to only 3% to 10%.

In turn, also landslide susceptibility is strongly affected by climate change. In a 1°C cooler climate, the area of high susceptibility would have been between 5% and 14% smaller. In a 4°C warmer climate, the area of high susceptibility could increase by 126% to 135%. Anticipated land-use/ land-cover changes only marginally reduced the effect because the anticipated changes were small. Limiting global warming to 1.5°C compared to pre-industrial climate would essentially eliminate the climate change effect on landslide susceptibility. Similar results were found for the 2014 landslide event.

A standardised household survey in the case study region Feldbach provides detailed insights into private preparedness behaviour and influencing factors. The survey covered a broad range of topics including risk perception, coping appraisal, the need for information and intentions to take protective measures. The widespread assumption that risk perception drives protective behaviour could not be confirmed. The most influential factors however, were found to be response efficacy and self-efficacy – the perceived ability to successfully take protective action. Apparently, the willingness to prepare for landslides does not depend on risk judgments, but from the perceived efficacy of mitigation measures and from the trust in one's own capabilities. Instead of using fear appeals to increase risk awareness among the population, private households should be approached by „information appeals“ about the availability and efficacy of mitigation measures. Furthermore, interventions are needed to strengthen self-efficacy beliefs of private households. The results provide useful starting points to improve private landslide preparedness and accomplish the shift towards a more integrated local risk management.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Hintergrund

Rutschungen sind eine relevante Naturgefahr für Österreichs Bevölkerung, Siedlungen und Infrastruktur (Schweigl und Hervás, 2009; APCC, 2014).

Die Südoststeiermark ist aufgrund der geologischen Situation bereits seit langem als ein für Rutschungen besonders anfälliges Gebiet bekannt. In der Geländemorphologie sind die Anzeichen älterer Rutschungsaktivitäten gut zu erkennen. Zwei Haupttypen von Hangrutschungen können unterschieden werden: flachgründige Rutschungen sind weniger als 2 m tief, und der Hang bewegt sich typischerweise schnell (bis zu mehreren m/s). Tiefgründige Hangrutschungen sind tiefer, bewegen sich langsam (cm bis m/Tag) und sind tendenziell größer als flachgründige Hangrutschungen. Die wichtigsten Auslöser für Hangrutschungen in Österreich sind Starkniederschläge, langanhaltende Niederschläge und eine schnelle Schneeschmelze (Schweigl und Hervás, 2009): die Kohäsion wird reduziert und positiver Porenwasserdruck kann aufgebaut werden, welcher die Hangstabilität reduziert (APCC 2014).

Im Juni 2009 war die Südoststeiermark besonders stark von Hangrutschungen betroffen. Ein abgeschnürtes Höhentief über der Adria sorgte für wiederkehrende Gewitter. In Folge dessen wurden 3000 Rutschungen im Bezirk Feldbach registriert (Hornich & Adewöhrer, 2010). Umfangreiches Datenmaterial (Geländeaufnahmen, Fotos) steht zur Verfügung. Im September 2014 gab es ein ähnliches Ereignis in den Bezirken Leibnitz und Deutschlandsberg, wenn auch mit weniger Rutschungen.

Es ist plausibel, dass, durch stärkere Niederschläge infolge des Klimawandels, die Rutschungsgefährdung zunehmen könnte. Es gibt derzeit jedoch noch keine Studien, die eine Veränderung der Frequenz und Magnitude von Rutschungen einzig und allein auf Klimaveränderungen zurückführen können. Insbesondere gibt es noch keine Studien, die den Anteil des Klimawandels an einzelnen Hangrutschungsereignissen quantifizieren. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass die Zusammenhänge zwischen den relevanten Umweltparametern, der anthropogenen Einflussnahme und den auslösenden Ereignissen sehr komplex und häufig durch negative und positive Feedback-Mechanismen charakterisiert sind. Große Unsicherheiten gibt es vor allem in den Niederschlagsszenarien, aber auch in den Parametern zur Hanghydrologie und Hangstabilität, welche die Unsicherheiten bezüglich der Klimaänderung bei weitem übertreffen können.

Für den Schutz der Bevölkerung gegen Hangrutschungen sind kostenintensive Maßnahmen erforderlich, die öffentliche Budgets zunehmend unter Druck setzen. Um den öffentlichen Haushalt zu entlasten, sollen private Akteure stärker in die Risikoreduktion eingebunden werden (UNISDR 2015). Für das Gelingen eines integrierten Risikomanagements müssen jedoch die fördernden und hemmenden Faktoren privater Vorsorge bekannt sein. Nur so können gefährdete Haushalte gezielt motiviert werden, private Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Forschungsarbeiten im Bereich anderer Naturgefahren haben bereits gezeigt,

dass private Anpassung vor allem von der Risikowahrnehmung und Bewältigungseinschätzung der betroffenen Haushalte abhängt (Kellens et al. 2013).

Zielsetzung

Vor diesem Hintergrund hat das Projekt EASICLIM folgende Forschungsfragen formuliert:

1. In welchem Ausmaß kann die Stärke der Hangrutschungsereignisse von 2009 und 2014 auf den Klimawandel zurückgeführt werden?
2. Wie stark würden solche Ereignisse bei einem ungebremst voranschreitenden Klimawandel ausgeprägt sein? Und könnte das Hangrutschungsrisiko durch Aufforstung verringert werden?
3. Wie treffen Menschen in Risikogebieten Vorsorge bezüglich zukünftiger Hangrutschungen, und wie hängen die Risikowahrnehmung dieser Menschen und ihre Vorsorge-Absichten von verschiedenen Szenarien zukünftiger Hangrutschungsgefährdung ab?

Im Laufe des Projekts wurde absehbar, dass das Pariser Abkommen in der öffentlichen und politischen Debatte immer wichtiger wird, und damit auch das Ziel, die globale Erwärmung auf 1.5°C gegenüber dem vorindustriellen Klima zu begrenzen. Deshalb wurde das Projekt um Betrachtungen dieses Szenarios erweitert.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

4.1. Ausgangssituation und Projektziele

Die Geologie des voralpinen Untersuchungsgebietes in der Südoststeiermark wird von Lockersedimenten vom Neogen bis zum Quartär dominiert. Die Landbedeckung und -nutzung ist durch ein kleinräumiges Muster von Wald- und Agrarflächen mit Streusiedlungen gekennzeichnet. Das Klima ist vor allem im Sommer durch intensive lokale Niederschläge charakterisiert. Diese Rahmenbedingungen machen die Region besonders anfällig für Rutschungen.

Um den Einfluss von Klimawandel und Landnutzungsänderungen auf die Hangrutschungsgefährdung abschätzen zu können, benötigt es ein Modell, um das Auftreten von Hangrutschungen mit meteorologischen Ereignissen und Landnutzung zu verknüpfen. Die Vermessung der Hangrutschungsereignisse von 2009 und 2014 stellt einen Schatz an Beobachtungsdaten dar, der in Kombination mit Informationen zur Geomorphologie, Lithologie und Landnutzung/Landbedeckung sowie Meteorologie eine ideale Grundlage für die Entwicklung eines statistischen Modells der Hangstabilität bietet. Dieses Modell kann mit Klimamodelldaten und Landnutzungsszenarien gespeist werden, um den Einfluss dieser Größen auf die Hangrutschungsgefährdung abzuschätzen.

Die Abschätzung des Anteils des menschengemachten Klimawandels an einem Wetterereignis (und gegebenenfalls seinen Folgen) nennt sich Ereignis-Attribution (oder Zuordnung). In EASICLIM wurde der Ansatz der bedingten Ereignis-Attribution (Trenberth et al., 2015) gewählt. Bei diesem Ansatz wird das beobachtete Extremereignis bei unveränderter Wetterlage simuliert, aber unter abgeschwächtem oder fortgeschrittenem Klimawandel.

Ausgehend von diesen Ansätzen wurden Im EASICLIM Projekt folgende konkrete Projektziele formuliert:

- die Auswirkungen des Klimawandels auf die meteorologischen Ereignisse auf der Grundlage einer bedingten Attribution ergänzt durch eine Bewertung der Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation, zu bewerten;
- die - hypothetische - Intensität und das Auftreten der meteorologischen Ereignisse in einem wärmeren Klima zu bewerten, in dem das beobachtete Ereignis unter wärmeren Klimabedingungen simuliert wird (sogenannter Storyline Ansatz);
- auf Basis der vorhandenen Daten, die während dieser Ereignisse aufgezeichnet wurden, ein statistisches Modell zu entwickeln, das meteorologische Variablen mit Massenbewegungen verknüpft;
- die Auswirkungen vergangener und zukünftiger Klimaveränderungen auf das Auftreten von Rutschungen zu beurteilen und die relative Bedeutung von Klima- und Landnutzungsänderungen für Rutschungen zu bewerten;
- die Risikowahrnehmung und die Anpassungsbereitschaft der Bevölkerung, die durch Rutschungen gefährdet ist, zu bewerten und dadurch neue

Erkenntnisse für ein wirksames Risikomanagement auf privater und kommunaler Ebene zu gewinnen;

- die Ergebnisse einer breiteren Öffentlichkeit vorzustellen, einschließlich einer Fotoausstellung mit einem Wissenschaftsteil.

Das statistische Klima-Hangstabilitätsmodell wurde anhand von beobachteten Hangrutschungen und Prädiktoren kalibriert, die die Geomorphologie, Lithologie, Landnutzung/Landbedeckung sowie Meteorologie beschreiben. Die Entwicklung dieses Modelles wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt (Arbeitspaket AP 2). Ein hochauflösendes regionales Klimamodell wurde genutzt, um die meteorologischen Eingangsgrößen zu simulieren. Die Simulationen des tatsächlichen meteorologischen Ereignisses und die Simulation dieses Ereignisses unter Bedingungen ohne den aktuellen Klimawandel werden im Abschnitt 4.3 vorgestellt (AP 3), die Simulationen des Ereignisses unter zukünftigen Bedingungen wird im Abschnitt 4.4 erläutert (AP 4). Die Einflüsse von Klimawandel und Landnutzungsänderungen auf die Hangrutschungsgefährdung werden im Abschnitt 4.5 präsentiert (AP 5). Die Studie zu Risikowahrnehmung und Anpassungsbereitschaft wird in Abschnitt 4.6 behandelt (AP 6), und das begleitende Fotoprojekt in Abschnitt 4.7 (AP 7).

Die dynamische Modellierung der Wetterereignisse stellte sich als äußerst anspruchsvoll heraus, aus Zeitgründen konnte dieser Ansatz deshalb nur für eines der beiden Ereignisse angewendet werden. Da das Ereignis von 2009 deutlich schwerwiegendere Auswirkungen hatte, wurde der Schwerpunkt von EASICLIM auf dieses Ereignis gelegt. Das Ereignis von 2014 wurde mit einem vereinfachten Modellierungsansatz analysiert.

4.2 Klima - Hangstabilitätsmodell (AP2)

4.2.1 Ableitung ereignisbasierter Rutschungsinventare

Der Begriff "Rutschung" umfasst ein breites Spektrum von Prozessen. Die Einflussparameter und Korrelationen sind so vielfältig wie die Auswirkungen der Prozesse. Eine differenzierte Betrachtung für tief- und flachgründige Prozesse ist daher notwendig (Cruden & Varnes 1996).

Das Untersuchungsgebiet (siehe Abb. 1) ist durch zwei Haupttypen von Massenbewegungen gekennzeichnet:

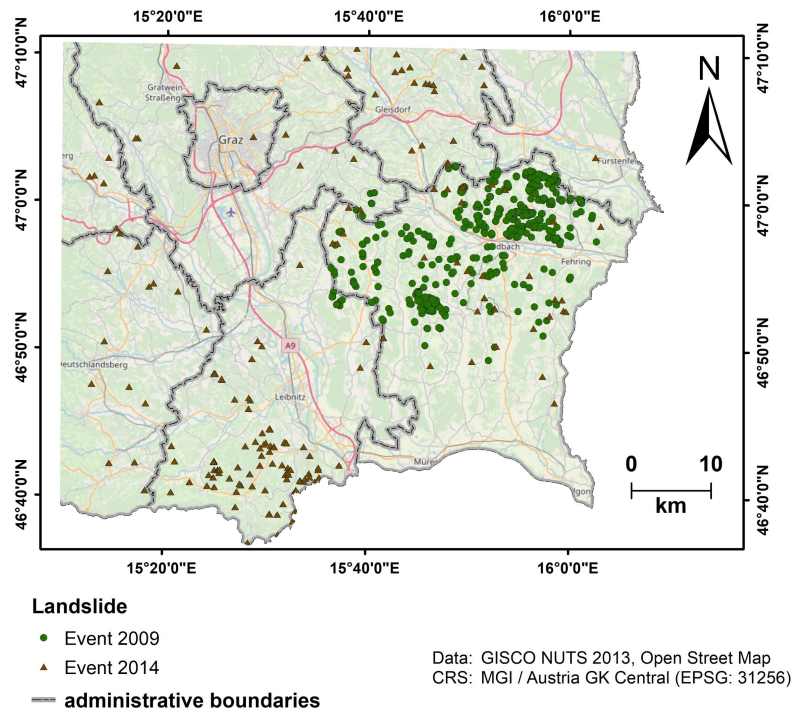
1. permanente tiefgründige Rutschungen und Hangkriechen
2. spontane flach- bis mittelgründige Rutschungen und Hangmuren

In EASICLIM wurde nur Typ 2) betrachtet, da für Typ 1) kein spezifisches auslösendes Ereignis definiert werden kann. Für das Ereignis von 2009 existieren verschiedene Inventare und eine umfangreiche Fotodokumentation. Die Daten wurden von der Geologischen Bundesanstalt (GBA), dem Institut für Militärisches Geowesen (IMG) und der Abteilung für Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit (Land Steiermark, LS) zur Verfügung gestellt.

Sie wurden hinsichtlich ihrer Relevanz (Mindestgröße, Mindestbewegung der Rutschung, geologische Situation) und Zuverlässigkeit analysiert. Von insgesamt

689 Massenbewegungen, die von der GBA als Punktdaten in zwei "Schwerpunktgebieten" dokumentiert wurden, wurden 342 als "relevant und zuverlässig" eingestuft. Das IMG kartierte überwiegend in nicht bewaldeten Gebieten mittlere und große Rutschungen als Polygone (301), kleine als Punkte (142) und zusätzlich ca. 300 Anrisse.

*Abbildung 1:
Verteilung der
Rutschungen
während der
Ereignisse 2009
und 2014*



Für das 2014er Ereignis sind nur Daten des Landes Steiermark verfügbar. Die Rutschungen konzentrierten sich auf ein Gebiet südlich von Leibnitz (vgl. Abb. 1). Nur Massenbewegungen, die Schäden an Infrastruktur und/oder Gebäuden verursacht haben, wurden in das Inventar aufgenommen. Von insgesamt 508 Ereignissen wurden 187 Rutschungen als relevant eingestuft (Mindestgröße, untersucht durch Experten mit vorliegendem Gutachten).

4.2.2 Datenerhebung und -aufbereitung

Meteorologische Daten (Stationsdaten von ZAMG und WegenerNet, INCA-Radardaten) und Umgebungsdaten stammen aus den Datenbanken der Projektpartner und dem GIS Steiermark. Das digitale Geländemodell, das für die Berechnung aller Landoberflächenvariablen verwendet wurde, wurde mittels bilinearer Interpolation auf eine Auflösung von 10 x 10 m resampelt.

4.2.3 Analyse rutschungsauslösender Niederschlagscharakteristika

Die genauen Auswirkungen von Starkregen auf die Auslösung von Rutschungen sind nach wie vor wenig bekannt (Crosta & Frattini 2001, Melillo et al. 2015). Die Schwierigkeiten bei der Definition von Niederschlagsschwellenwerten wurden im Projekt GLADE (ACRP, 8. Call, Nr. R15AC8K12598) behandelt.

Vor allem flachgründige Rutschungen zeigen eine hohe Sensitivität sowohl für die räumliche und zeitliche Verteilung von Niederschlägen als auch für die Niederschlagsintensität, die Niederschlagsdauer und die Vorbefeuchtung (Crosta

& Frattini 2001). Die Niederschlagsereignisse zum Zeitpunkt der Rutschungen wurden nach dem automatisierten Ansatz von Melillo et al. (2015) extrahiert.

4.2.4 Entwicklung des statistischen Hangrutschungsgefährdungsmodells

a.) Auswahl und Abgrenzung relevanter Umgebungsparameter

Zur Analyse der Suszeptibilität auf lokaler bis regionaler Ebene und die erfolgreiche Anwendung der wichtigsten Prädiktoren gibt es zahlreiche Arbeiten (z.B. Van Westen et al. 2008, Goetz et al. 2011, Petschko et al. 2014). Morphologische Parameter (LSV), meteorologische Variablen, Lithologie und Landnutzung/Landbedeckung (LULC) wurden mit den erfassten Rutschungen verknüpft. Die Berechnung der LSV auf Basis des Laserscan-Geländemodells umfasste Hangexposition, Konvergenzindex (100 und 500 m Radius), Hangkrümmung, Fließakkumulation, normierte Höhe, Hangneigung, Einzugsgebietsneigungswinkel, topographischen Positionsindex (TPI) und topographischen Feuchtigkeitsindex. Die Lithologie wurde in fünf Einheiten ausgewiesen, die Variable Waldbedeckung bestand aus vier Klassen. Die Berechnung der meteorologischen Variablen basierte auf den INCA-Niederschlagsdaten. Hier wurden zwei Parameter extrahiert: (1) 5-Tagesniederschlag vor dem Ereignisdatum und (2) die maximale dreistündige Niederschlagsintensität zum Zeitpunkt der Auslösung der Rutschung. Um die INCA-Daten in das Suszeptibilitätsmodell zu integrieren, wurden die Maxima von 5-Tages-Niederschlag und 3-Stunden-Intensität (INCA-Daten) während der beiden Ereignisperioden (21.-24.06.2009; 12.-15.09.2014) für jedes Pixel mittels eines beweglichen Fensters definiert. Die Klimainformationen wurden unter Verwendung der lokalen inversen Distanzgewichtung mit 16 berücksichtigten Nachbarpunkten auf eine Auflösung von 10 m interpoliert.

b.) Einrichtung eines Bezugssystems für die Gefährdungsmodellierung

Für die Modellierung der Rutschungsdisposition wurden semiparametrische generalisierte additive Modelle (GAM) verwendet (Goetz et al. 2011, Vorpahl et al. 2012, Petschko et al. 2014, Brenning et al. 2015), verwendet.

Da zwei ereignisbasierte Inventare zur Verfügung standen, waren die Übertragbarkeit des Modells und die Bedeutung der ausgewählten Umgebungsparameter von großem Interesse.

4.2.5 Bewertung des statistischen Gefährdungsmodells

a.) Räumliche und zeitliche Modellvalidierung

Die Validierungsergebnisse zeigten, dass die Modelle im Durchschnitt eine akzeptable bis hervorragende Eignung zur Modellierung der Rutschungsdisposition aufwiesen.

SpCV zeigte hervorragende Diskriminierungsfähigkeiten mit 'GAM-Co' als bestes Modell bezüglich des medianen AUROC (mAUC) und des Interquartilbereichs (IQR). SpTempCV ergab eine ausgezeichnete Rutschungsdiskriminierung für 'GAM-09' und 'GAM-Co' bei der Vorhersage des Ereignisses von 2014 bzw. 2009. Die Schätzungen für 'GAM-14' bei der Vorhersage des Ereignisses von 2009 waren zwar weniger gut, lagen aber trotzdem im akzeptablen Bereich.

Die Validierungsergebnisse führten zu dem Schluss, dass die Modellierung von kombinierten Ereignissen gegenüber der Modellierung von Einzelereignissen sowie die Verwendung des gesamten Satzes von Eingangsvariablen (d.h. einschließlich meteorologischer und LULC-Variablen) zu bevorzugen ist.

b.) Variablenbewertung

Für die Bewertung wurden alle Modelle verwendet, die während der SpCV für die "ereignisbasierten Modelle" erstellt wurden. Dabei wurde den meteorologischen und LULC-Variablen besondere Beachtung geschenkt.

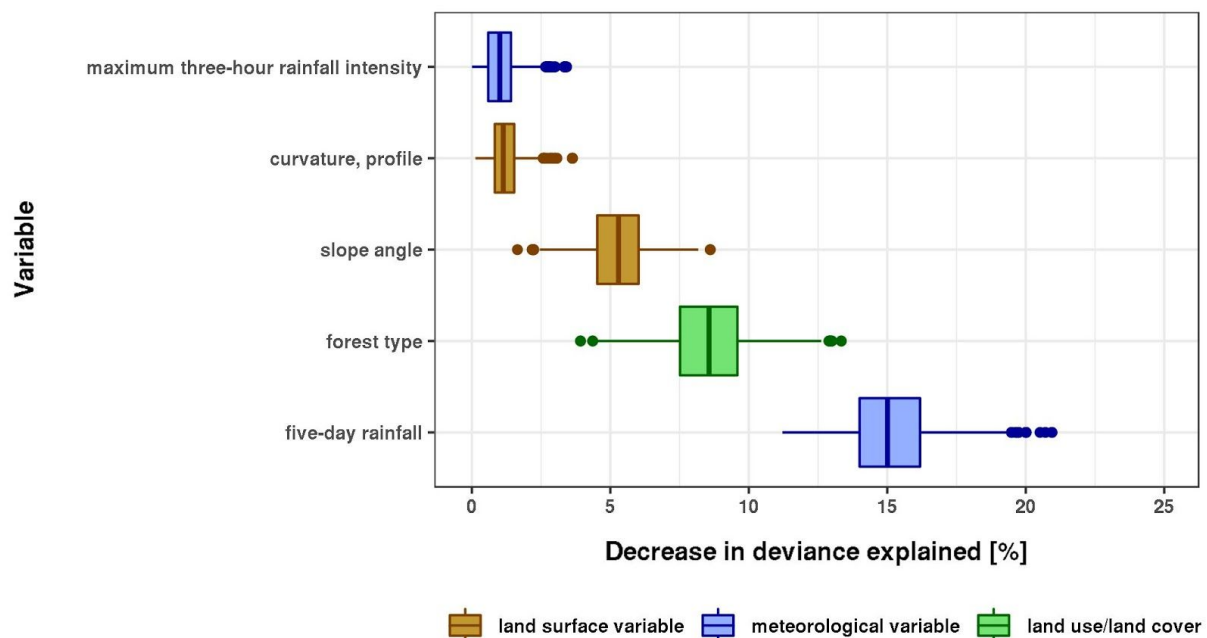


Abbildung 2: Variablenbedeutung unter Verwendung der erklärten Abweichungsabnahme [%]. Auswahl der fünf wichtigsten Variablen geordnet nach mDD.

Die Auswertung zeigte die hohe Bedeutung der meteorologischen und LULC-Variablen (Abb. 2): Der 5-Tages-Niederschlag war die wichtigste Variable, gefolgt von der Variablen Wald. Die maximale dreistündige Niederschlagsintensität rangierte unter den ersten fünf, jedoch mit geringerer Bedeutung. Die OR zwischen dem Auftreten von Rutschungen und der LULC-Variablen Wald zeigte deutlich eine geringere Wahrscheinlichkeit für Rutschungen auf Waldgebieten als auf Nicht-Waldgebieten. Darüber hinaus war eine Unterscheidung zwischen den Waldklassen erkennbar: im Nadelwald bestand im Durchschnitt eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Rutschungen als im Misch- oder Laubwald.

Die Beziehungen zwischen dem Auftreten von Rutschungen und meteorologischen Variablen, waren komplex: Für den 5-Tages-Niederschlag zeigte das CSF Plot eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Rutschungen bei einer höheren Regenmenge bis zu etwa 75 mm. Für die maximale dreistündige Niederschlagsintensität zeigte das CSF-Plot eine höhere Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Rutschungen mit einer höheren Niederschlagsintensität zwischen etwa 4 und 10 mm/h. Ab etwa 10 mm/h war eine höhere Variabilität erkennbar.

4.2.6 Modellierung auf physikalischer Basis

Aus Vergleichsgründen wurde die statistische Modellierung durch ein prozessbasiertes Modell unter Verwendung der Software SINMAP 2.0 ergänzt (Pack et al., 2005). Für EASICLIM stand eine umfangreiche Datenbank mit den erforderlichen geotechnischen Eingangsparametern zur Verfügung. Verschiedene Niederschlagsszenarien wurden durch Variation der Infiltrationswerte modelliert, um die effektive Infiltration für eine kritische Periode zu quantifizieren. Die Starkregendaten wurden auf Basis der Bemessungsniederschlagsdaten des Hydrographischen Dienstes (im Datenportal ehyd.gv.at österreichweit in einem 6x6 km Raster verfügbar) berechnet. Da die Transmissivität stark von der Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht abhängt, wurde diese GIS-basiert nach Akumu et al. (2016) modelliert. Die modellierten Mächtigkeiten lagen zwischen ca. 0,2 und 1,2 m, was mit den Geländedaten gut übereinstimmte.

Die aus der Modellierung resultierenden Sicherheitsfaktoren (SI-Werte) wurden in vier Kategorien klassifiziert: SI-Werte > 1,3: hohe Stabilität; SI-Werte zwischen 1,3 und 1,1: mäßige Stabilität; SI-Werte zwischen 1,1 und 0,7: geringe Stabilität; und SI-Werte < 0,7: sehr geringe Stabilität.

Es ist zu betonen, dass SINMAP (und alle physikalisch basierten Modelle) vor allem für Untersuchungen auf der Hangskala entwickelt wurde. Dies liegt vor allem an der hohen Variabilität wichtiger Material- und Umgebungsparameter und den fehlenden Informationen über solche Werte.

4.3 Einfluss des Klimawandels auf das Wetterereignis von 2009 (WP3)

4.3.1 Analyse der Feuchtequellen der Wetterereignisse

Als Grundlage für die Spezifizierung des Klimamodellierungsansatzes wurde im Rahmen einer Masterarbeit eine Lagrange-Analyse der Feuchtequellen sowohl des 2009er als auch 2014er Ereignisses basierend auf den ERA-Interim Reanalysedaten (Dee et al., 2011) durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde der Ansatz von Gustafsson et al. (2010) mit dem Trajektorienmodell HYSPLIT (Stein et al. 2015) genutzt. Die zeitliche Entwicklung der Feuchte in allen modellierten Trajektorien (also der Bewegung von Luftpaketen), die während der 4 Tage mit den stärksten Niederschlägen die Zielregion erreichten, wurde betrachtet.

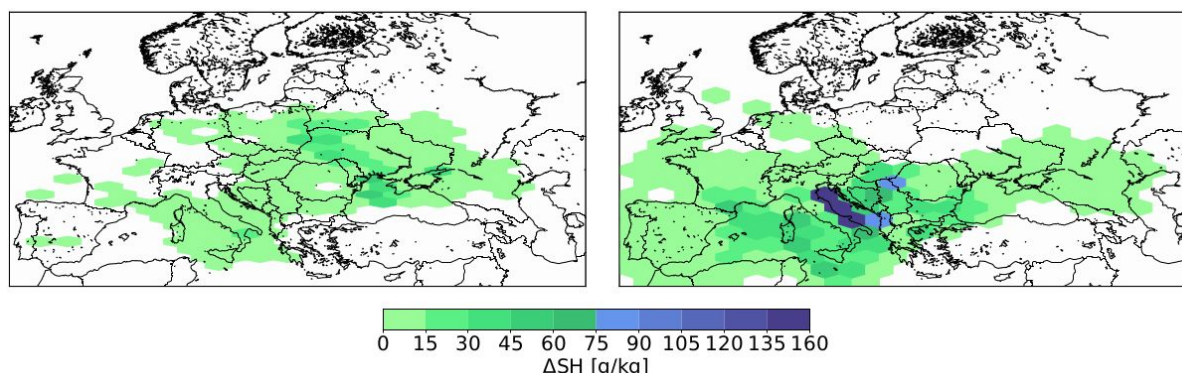


Abbildung 3: Gesamte gewichtete Feuchteaufnahme. Links: Ereignis von 2009, rechts: Ereignis von 2014.

Abbildung 3 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Während des 2009er Ereignisses wurde Feuchte gleichmäßig verteilt über ganz Mittel- und Osteuropa sowie dem zentralen Mittelmeer aufgenommen. Während des 2014er Ereignisses wurde Feuchte über einer großen Fläche zwischen der Iberischen Halbinsel im Westen und dem Kaukasus im Osten aufgenommen, jedoch mit einem deutlichen Beitrag aus der Adria und dem Balkan. Um diese Feuchteaufnahme explizit unter verschiedenen Klimabedingungen modellieren zu können, wäre also ein großes Modellierungsgebiet nötig.

4.3.2 Simulation des beobachteten Ereignisses

Die Untersuchung, inwieweit der Klimawandel einen Einfluss auf die Starkniederschläge im 2009er Wetterereignis hatte (bedingte Ereignis-Attribution, Trenberth et al., 2015), und inwieweit sich die Niederschläge unter fortschreitendem Klimawandel ändern würden (Ereignis-Storylines, Shepherd et al., 2018) wurden mit einem sogenannten Pseudo-Globalwarming Ansatz (Schaer et al., 1996) durchgeführt. Dazu wurde das Ereignis zunächst unter tatsächlichen Bedingungen mit dem regionalen Klimamodell (RCM) CLM 5.0 (Böhm et al., 2006; Rockel et al., 2008) simuliert, das bei einer horizontalen Auflösung von 3km konvektive Starkniederschläge realistisch abbilden kann. Als Simulationsgebiet wurde der Ostalpenraum ($13^{\circ}\text{O} - 20^{\circ}\text{O}$, $43^{\circ}\text{N} - 50^{\circ}\text{N}$) gewählt. Die 2009 tatsächlich beobachtete Wetterlage wurde an den Rändern aufgeprägt, als Datengrundlage diente die aus der Wettervorhersage stammende IFS Analyse.

Unsicherheiten aus regionalen natürlichen Schwankungen wurden berücksichtigt, indem das Ereignis 10x mit leicht variierten Startbedingungen simuliert wurde (der Startzeitpunkt der Simulationen wurde jeweils um 3 Stunden verschoben).

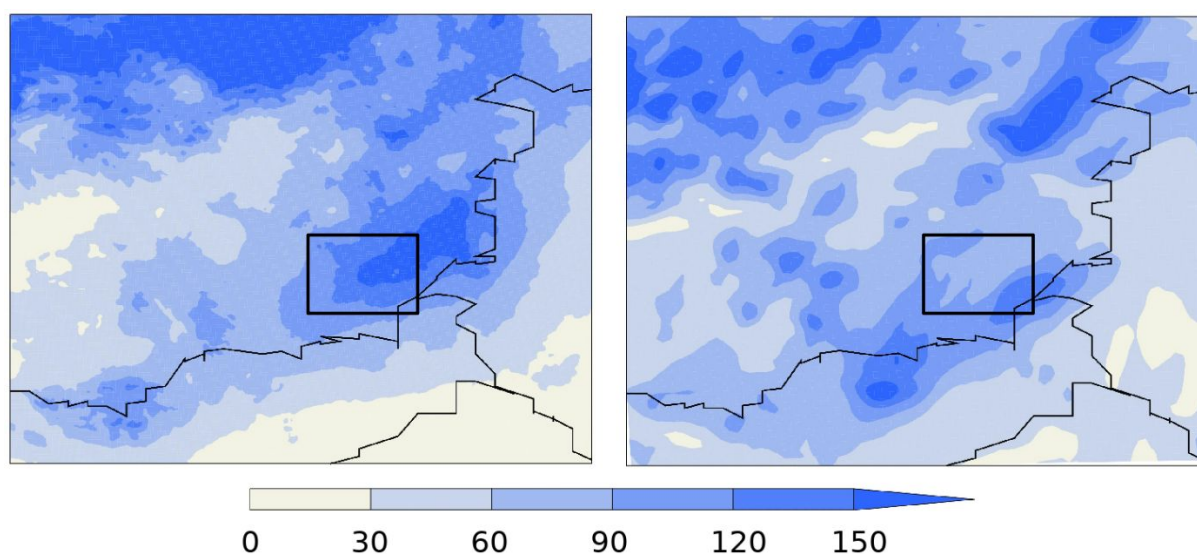


Abbildung 4: Beobachtetes und simulierter 5-Tages Niederschlag (21. bis 25. Juni 2009) [mm]. Links: INCA Beobachtungsdaten. Rechts: Simulation mit CLM.

Abbildung 4 zeigt den über fünf Tage aggregierten Niederschlag während des 2009er Ereignis, links die Beobachtung, rechts das Mittel über die 10 Ensemble-

Simulationen. Während der Einfluss natürlicher Schwankungen auf den maximalen 3-Stunden Niederschlag deutlich war, war er schwach für den 5-Tages Niederschlag (nicht gezeigt). Es zeigt sich eine insgesamt gute Übereinstimmung, jedoch hat sich das Hauptereignis in den unteren Rand der Zielregion (Box) verschoben. Damit diese systematische Verschiebung nicht zu einer verzerrten Abschätzung der Änderungen in der Hanginstabilität führen, wurde für die Berechnungen dieser Änderungen simulierte Niederschläge als Referenz (gegenwärtiges Klima) genutzt.

4.3.3 Simulation des Ereignisses mit kontrafaktischen Bedingungen

Um den Einfluss des Klimawandels auf das 2009er Ereignis abzuschätzen, haben wir die Randbedingungen der RCM Simulationen so verändert, dass sie einem 1°C kälteren Klima entsprechen. Diese Änderungen wurden mithilfe von Globalmodell (GCM-)Simulationen bestimmt. Da der Klimawandel in den letzten Jahrzehnten noch stark von natürlichen Schwankungen überlagert war, haben wir das Signal-Rausch-Verhältnis optimiert, indem wir die Änderungen aus Simulationen zum

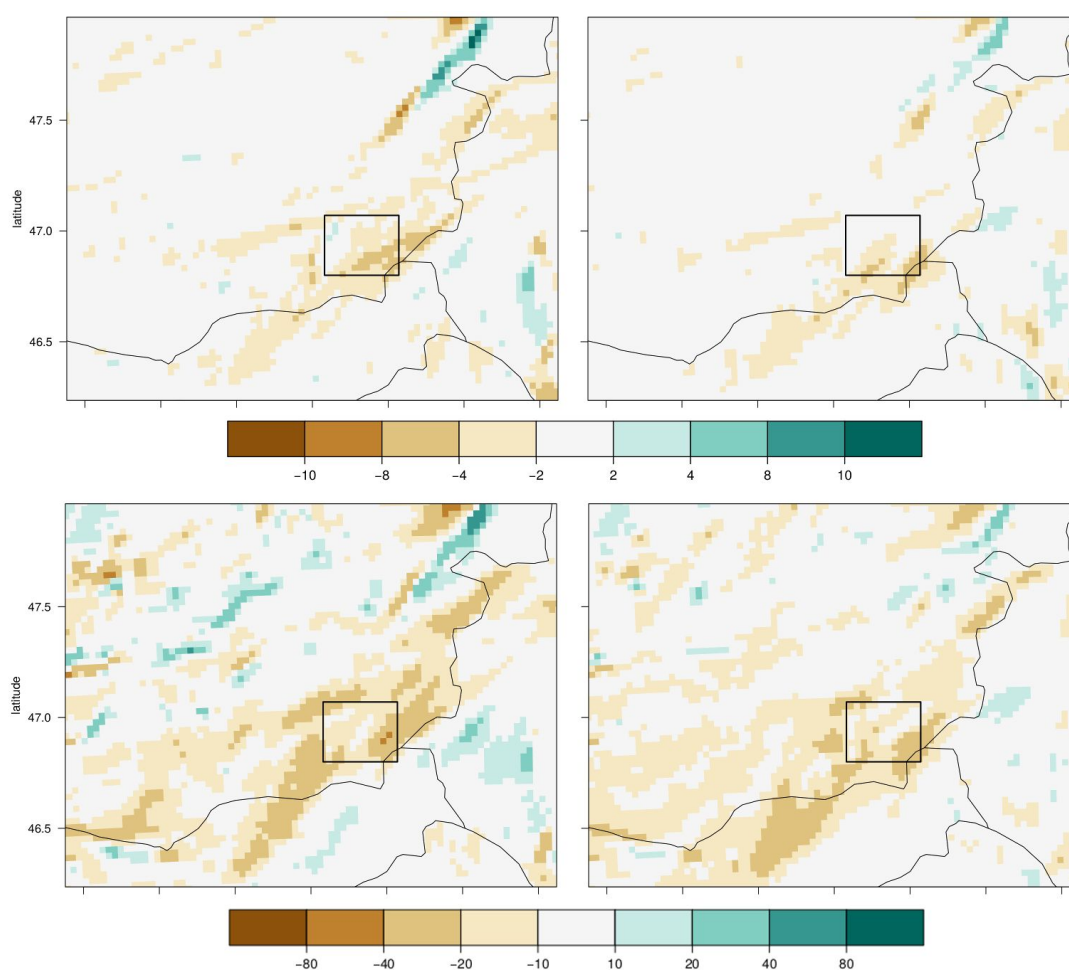


Abbildung 5: Rückgang im simulierten Niederschlag entsprechend der kontrafaktischen Randbedingungen (1°C kälteres Klima) [mm]. Oben: maximaler 3h Niederschlag während dem 21. bis 25. Juni. Unten: 5-Tages Niederschlag. Links: Randbedingungen aus dem GCM MIROC-ESM, rechts: Randbedingungen aus dem GCM HadGEM2.

Tabelle 1: Bedingte Attribution von Niederschlagsänderungen für das 2009er Ereignis in der Feldbachregion (Box in Abbildung 5).

	Klimaänderung 1 (HadGEM2)	Klimaänderung 2 (MIROC-ESM)
Maximaler 3h Niederschlag	-22%	-27%
5-Tages Niederschlag	-15%	-17%

RCP8.5 berechnet haben. Diese Änderungen wurden dann umskaliert, so dass sie einer Abkühlung von einem Grad entsprechen.

Abbildung 5 zeigt das Ensemble-Mittel der simulierten Änderungen für die beiden Niederschlagsprädiktoren bezogen auf die Referenzsimulationen für das jetzige Klima. Tabelle 1 präsentiert die Flächenmittel für die Zielregion. Obwohl es regionale natürliche Schwankungen gibt, wird deutlich, dass das Ereignis in einem kälteren Klima deutlich weniger intensiv gewesen wäre.

Die Änderungen im 5-Tages Niederschlag entsprechen grob der zweifachen Clausius-Clapeyron Beziehung. Solche eine starke Änderung ist plausibel, da das Ereignis insgesamt von starken Gewittern dominiert war, die dieses Skalierungsverhalten zeigen. Die Ergebnisse für den maximalen 3h Niederschlag deuten eine stärkere Änderung an, doch hier war die natürliche Variabilität stark ausgeprägt, sodass zufällige räumliche Verschiebungen das Ergebnis verfälschen können.

4.3.4 Untersuchung von Änderungen in Adriastürmen

Andauernde Starkniederschläge über Österreich werden typischerweise von Tiefdruckgebieten erzeugt, die über die Adria ziehen, vor allem von Vb Zyklonen oder abgeschnürten Höhentiefs. Um die bedingte Ereignis-Attribution zu komplementieren, haben wir Änderungen im Auftreten solcher Ereignisse in Folge des Klimawandels untersucht. Studien zu beobachteten abgeschnürten Höhentiefs (Nieto et al., 2008) und den häufig zusammen mit diesen auftretenden blockierenden Wetterlagen (Woollings et al., 2018) legen nahe, dass es bisher keine robusten Trends im Auftreten dieser Ereignisse gegeben hat. Wir haben uns deshalb auf die Analyse von Trends in Vb Zyklonen fokussiert. Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu optimieren, haben wir auch hier Änderungen für das RCP8.5 Szenario berechnet (siehe 4.4.3), und diese dann umskaliert, so dass sie einem 1°C kühlerem Klima entsprechen. Es zeigt sich, dass Änderungen im Auftreten dieser Stürme marginal sind. Insbesondere für den Sommer war die mittlere Änderung fast Null, die Unsicherheiten lagen zwischen -5 und +8 Stürmen über einen Zeitraum von 30 Jahren (siehe Abb. 7, umskaliert auf 1°C). Dieses Ergebnis deutet an, dass der Klimawandel Ereignisse wie das von 2009 vor allem durch thermodynamische Effekte beeinflusst, nämlich, dass Niederschlagsintensitäten durch den Klimawandel stärker wurden. Diese Ergebnisse bekräftigen auch, dass der Ansatz der bedingten Attribution gerechtfertigt ist (siehe Abschnitt 6.2).

4.4 Zukünftige Meteorologische Entwicklungen (WP4)

4.4.1 Ableitung von Änderungen in den Randbedingungen

Um das 2009er Ereignis unter Klimawandel zu simulieren, mussten die Randbedingungen so modifiziert werden, dass sie den Einfluss des Klimawandels auf die großskaligen thermodynamischen Bedingungen von vergleichbaren zukünftigen Ereignissen beschreiben. Hierzu änderten wir sowohl Bodendruck als auch Temperatur und relative Feuchte. Da der Klimawandel verschiedene Schichten der Atmosphäre unterschiedlich betrifft, haben wir Änderungen für jede Modellschicht berechnet. Diese Änderungen wurden wie folgt berechnet: Aus GCM Simulationen wurde eine große Zahl von vergleichbaren Ereignissen extrahiert, sowohl für das gegenwärtige Klima (1975-2004) als auch für die Zukunft (2071-2100, gemäß RCP8.5). Für Gegenwart und Zukunft wurde jeweils die über die Ereignisse gemittelte Schichtung von Temperatur und relativer Feuchte berechnet, die Differenz von Zukunft und Gegenwart ergibt die Änderungen, die auf die Randbedingungen des RCMs aufgeprägt wurden. Die Ereignisse wurden definiert als alle 3-Tages Niederschlagsereignisse innerhalb einer Gitterbox in der Region $13^{\circ}\text{O} - 20^{\circ}\text{O}$ und $43^{\circ}\text{N} - 50^{\circ}\text{N}$, die das 99te Perzentil des 3-Tages Niederschlags in der jeweiligen Gitterbox überschritten (jedes Datum wurde nur 1x gezählt).

Zusätzlich zum Szenario RCP8.5, das einem ungebremsen Klimawandel (und damit einem Worst-Case-Szenario) entspricht, wurde auch eine Erwärmung um 1.5°C gegenüber dem vorindustriellen Klima, entsprechend dem Pariser Klimaabkommen, betrachtet. Hierzu wurde angenommen, dass dieses Ziel einer weiteren Erwärmung von 0.5°C gegenüber dem heutigen Klima entspricht. Änderungen in den Randbedingungen, die diesem Szenario entsprechen, wurden aus dem RCM8.5 Szenario abgeleitet, indem die Änderungen entsprechend umskaliert wurden.

Unsicherheiten in der Ausprägung des Klimawandels wurden berücksichtigt, indem mehrere GCMs aus dem CMIP5 Ensemble (Taylor et al., 2012) betrachtet wurden, die eine breite Änderung in den oben betrachteten 3-Tages Niederschlägen repräsentieren. Von den betrachteten Modellen werden im folgenden nur zwei berücksichtigt (HadGEM2 und MIROC-ESM), da sich bei den RCM Simulationen zu den anderen GCMs eine deutliche Verschiebung des Niederschlagsereignisses zeigte, so dass ein quantitativer Vergleich von Gegenwart und Zukunft schwierig ist. Die Ergebnisse sind den gezeigten jedoch qualitativ sehr ähnlich.

4.4.2 Simulation der Meteorologischen Entwicklungen

Abbildung 6 zeigt Änderungen im simulierten Ensemble-Mittel für den 5-Tages Niederschlag. Über die gesamte Region betrachtet, sind der leichte Anstieg im 1.5°C Szenario als auch die starke Intensivierung im RCP8.5 Szenario sehr deutlich zu sehen. Tabelle 2 fasst die Ergebnisse sowohl für den 5-Tages als auch den maximalen 3-Stunden Niederschlag in der Feldbachregion (Box) zusammen. Die Unterschiede zwischen den beiden GCMs sind hier marginal. Für das RCP8.5 Szenario sind Änderungen in beiden Indikatoren deutlich. Würde das 1.5°C Ziel erreicht, würde dies die Intensivierung des Ereignisses stark abschwächen.

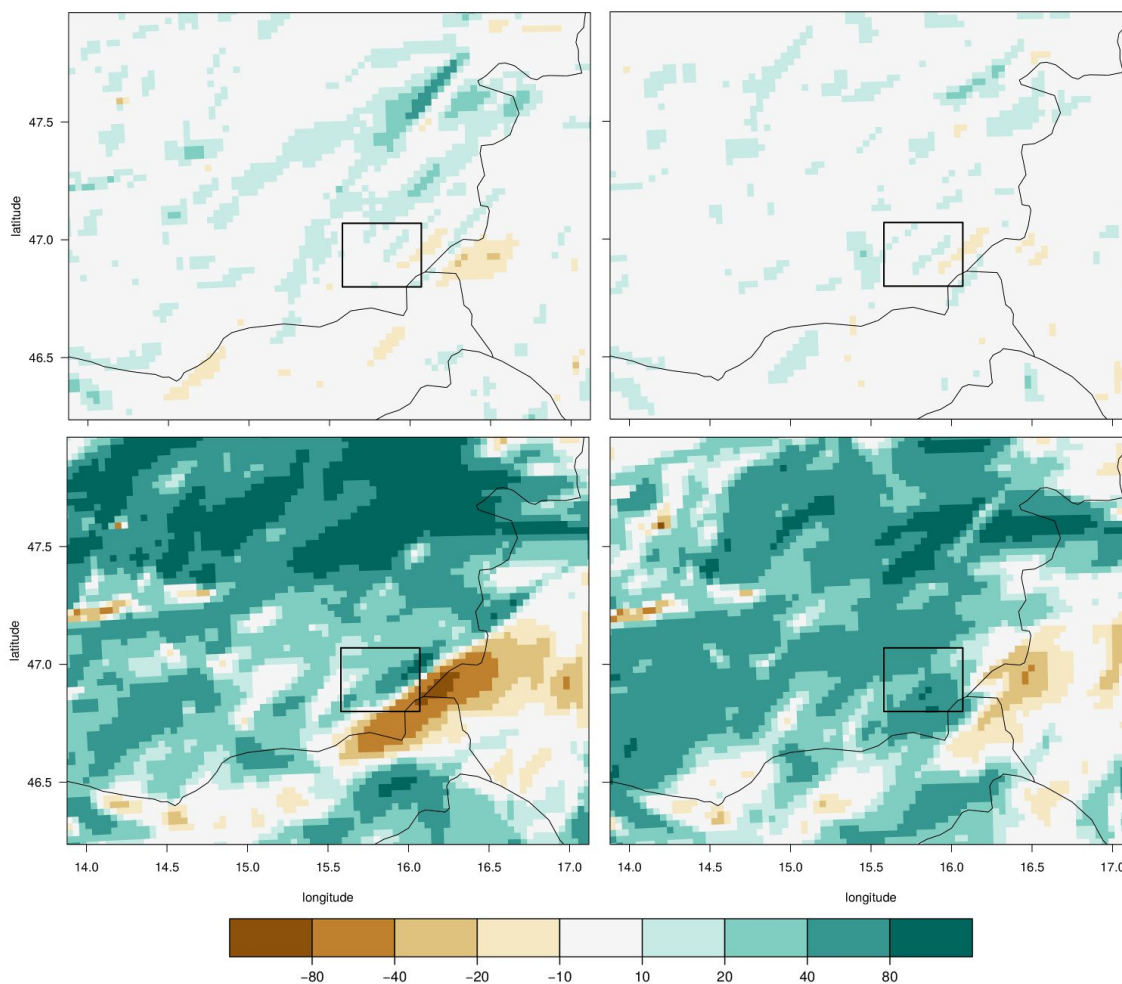


Abbildung 6: Intensivierung des simulierten 5-Tages Niederschlags (21.-25. Juni) für die hypothetischen Zukunftssimulationen [mm]. Oben: Randbedingungen entsprechend einer 0.5°C Erwärmung (Pariser Abkommen). Unten: Randbedingungen entsprechend dem RCP8.5 Szenario für das Ende des 21. Jahrhunderts. Links: Randbedingungen aus dem MIROC-ESM, rechts: aus dem HadGEM2.

Tabelle 2: Entwicklungen des zukünftigen Niederschlags für das 2009er Ereignis über der Feldbach Region.

	Klimaänderung 1 (HadGEM2)	Klimaänderung 2 (MIROC-ESM)
Maximaler 3h Niederschlag		
Paris (+0.5°C)	+10%	+8%
RCP8.5	+92%	+87%
5-Tages Niederschlag		
Paris (+0.5°C)	+3%	+4%
RCP8.5	+47%	+20%

4.4.3 Untersuchung von Änderungen in Adriastürmen

Um Änderungen in der Häufigkeit von Vb Zyklonen infolge des Klimawandels zu untersuchen, wurden die GCMs des CMIP5 Ensembles untersucht. Sturmsugbahnen wurden mittels des Detektionsalgorithmus TRACK von Hodges (1995) basierend auf dem 850hPa Vorticity-Feld identifiziert. Aus dem resultierenden Zyklonendatensatz wurde die Untermenge der Vb Zyklonen extrahiert (Nissen et al. 2013, Messmer et al. 2015). Die Fähigkeit von TRACK diese Zyklonen zu identifizieren, wurde getestet, indem die von TRACK aus der ERA-Interim Reanalyse ermittelte synoptische Entwicklung von 12 Stürmen, die zu Starkniederschlägen in den Alpen führten (Hofstätter et al., 2016), mit der tatsächlichen Entwicklung verglichen wurde. Die stärksten Vb Zyklonen werden, jedoch mit Ausnahmen, zufriedenstellend identifiziert. Die 24 betrachteten CMIP5 GCMs können Vb Zyklonen darstellen, jedoch überschätzen sie die mittlere Anzahl an Zyklonen (1.3 Vb Zyklonen pro Jahr in ERA-Interim, 2.3 im Mittel der CMIP5 Modelle).

Gegen Ende des Jahrhunderts zeigen die CMIP5 Modelle für das RCP8.5 Szenario eine leichte Reduktion in der Häufigkeit von Vb Zyklonen im Jahresmittel (Fig. 7). Diese Verringerung ist jedoch nicht robust über das CMIP5 Ensemble, und nur im Herbst findet sie sich in zumindest 75% der Modelle. Im Sommer ist die mittlere Änderung verschwindend.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass der Einfluss des Klimawandels auf die Änderung in der Anzahl relevanter Stürme relativ schwach ist und deshalb auch der genutzte Pseudo-Globalwarming Ansatz gerechtfertigt ist (Abschnitt 6.2).

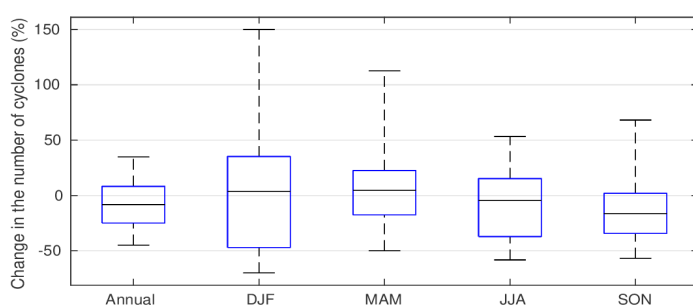


Abbildung 7: Änderung in der Häufigkeit von Vb Zyklonen, simuliert von 24 CMIP5 GCMs für das RCP8.5 Szenario. Differenz der mittleren Anzahl zwischen 2069-2099 und 1975-2005. Gezeigt sind Median, Interquantilabstand (Box) und volle Spannweite (Whiskers).

4.5 Einfluss von Klimawandel und Landnutzungsänderungen auf die Rutschungen (AP5)

Um Änderungen in der Hangrutschungsgefährdung, die sowohl durch den Klimawandel als auch durch Landnutzungsänderungen verursacht wurden, zu quantifizieren, haben wir zunächst Suszeptibilitätswerte für das heutige Klima, basierend auf den simulierten Niederschlagswerten und der tatsächlichen Landnutzung, als Referenz simuliert.

Darauf aufbauend haben wir sowohl kontrafaktische vergangene als auch zukünftige Suszeptibilitäten simuliert, basierend auf den meteorologischen Entwicklungen aus AP3 und AP5 sowie den in Abschnitt 4.5.2 beschriebenen Landnutzungszenarien. Wir haben bewusst Referenzwerte genutzt, die auf

Modellsimulationen basieren, um zu vermeiden, dass Modellbiase und Klimaänderungssignale vermischt werden. Dies entspricht einer impliziten Biaskorrektur. Um interne regionale Wettervariabilität zu berücksichtigen, wurden 10 RCM Ensemblesimulationen sowohl für die Simulationen der Gegenwart als auch für die Änderungen genutzt (siehe AP 3 und AP4).

Für die Gefährdungsmodellierung unter Berücksichtigung von Umweltveränderungen wurde ein finales, an den kombinierten Datensatz angepasstes Modell entwickelt.

Die Vorhersagen wurden über jede Realisierung und jedes Klimamodell unter Verwendung des Medianwerts für das finale GAM gemittelt (d.h. 1 Vorhersage pro Realisierung, 10 Realisierungen pro Klimamodell, eine gemittelte Vorhersage pro Klimamodell). Anschließend mussten die Vorhersagen jedes Modells und jeder Simulation klassifiziert werden. Dafür wurden modellspezifische Schwellenwerte auf Grundlage der Ereignisdaten von 2009 bestimmt. Nach Petschko et al. (2014: 102) wurden Schwellenwerte für die folgenden Suszeptibilitätsklassen definiert:

- gering: 5 % der beobachteten Rutschungen fallen in diese Klasse
- mittel: 25 % der beobachteten Rutschungen fallen in diese Klasse;
- hoch: 70 % der beobachteten Rutschungen fallen in diese Klasse.

Um Suszeptibilitätsänderungen zu den jeweiligen Entwicklungen darzustellen, haben wir die Änderung in der Fläche betrachtet, die jeweils einer Suszeptibilitätsklasse zugeordnet ist.

4.5.2 Definition realistischer Landnutzungs- und Landbedeckungs-szenarien

Die wichtigsten rutschungsrelevanten LULC-Veränderungen werden die Waldbedeckung betreffen. Die derzeitige Waldstruktur ist durch einen kleinräumigen Wechsel verschiedener Waldtypen gekennzeichnet. Fichtenbestände sind nach wie vor häufig. Steigende Temperaturen werden jedoch den Druck von Waldschädlingen erhöhen (z.B. Schüler et al. 2013) so dass die Reduktion der Fichte das Hauptkriterium in den gemeinsam mit regionalen und lokalen Akteuren entwickelten Szenarien ist. Die meisten der heutigen Fichtenbestände werden durch Laubbäume (z.B. Buche, Eiche, Schwarzerle) ersetzt werden. Bei ungünstigen landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen (z.B. Hangneigung über 20°, tiefgründige Rutschungen) ist generell noch mit einer leichten Zunahme der Waldfläche zu rechnen.

4.5.3 Evaluation der simulierten Prädiktoren für das gegenwärtige Klima

Unser Modellierungsansatz nimmt an, dass die Niederschlagsprädiktoren für die Hangrutschungs-Suszeptibilitäten realistisch simuliert sind. In Abschnitt 4.3.2 wurde bereits gezeigt, dass die Niederschlagsmuster realistisch simuliert sind. Zusätzlich wird hier untersucht, ob das Gefährdungsmodell realistische Suszeptibilitätsmuster simuliert, wenn es mit simulierten Niederschlägen angetrieben wird.



Abbildung 8: räumliche Verteilung der Hangrutschungs-Suszeptibilitätsklassen für beobachteten (links) und simulierten (rechts) Niederschlag.

Abbildung 8 zeigt eine insgesamt gute Übereinstimmung zwischen den Suszeptibilitäten, die basierend auf den INCA Beobachtungen vorhergesagt werden, und denen, die auf Basis der simulierten Niederschläge vorhergesagt werden. Die Verschiebung des Hauptniederschlagsereignisses zeigt sich jedoch auch in einer Verschiebung hoher Suszeptibilitäten nach Süden.

4.5.4 Bedingte Attribution der Hangrutschungs-Suszeptibilität

Tabelle 3: Bedingte Attribution der Hangrutschungs-Suszeptibilität in der Region Feldbach (Ensemble Median)

Klimaänderung 1 (HadGEM2)	Klimaänderung 2 (MIROC-ESM)
-5%	-14%

Tabelle 3 fasst die Ergebnisse der bedingten Attribution der Hangrutschungs-Suszeptibilität zusammen. Angeführt ist die Änderung der Fläche, die von hoher Hangrutschungs-Suszeptibilität betroffen ist. Die von hoher Suszeptibilität betroffene Fläche wäre ohne den Klimawandel in der Region Feldbach etwa 5 bis 14% kleiner gewesen. Diese Änderungen sind kleiner als die im Niederschlag, was sich durch den nichtlinearen Zusammenhang zwischen betroffener Fläche und Niederschlag erklären lässt.

4.5.5 Zukünftige Entwicklungen der Hangrutschungs-Suszeptibilität

Im nächsten Schritt haben wir Änderungen in der Hangrutschungs-Suszeptibilität betrachtet, unter der Annahme, dass das (in Bezug auf die großskalige Zirkulation) gleiche Wetterereignis unter fortschreitendem Klimawandel auftreten würde. Dazu haben wir sowohl ein Szenario mit ungebremsen Klimawandel betrachtet, was einen Worst Case darstellt, sowie ein Szenario, in dem das 1.5°C Ziel des Pariser Klimaabkommens erreicht wird (siehe AP4). Unsicherheiten in der Ausprägung der Klimaänderungen wurden berücksichtigt, indem zwei verschiedene GCMs betrachtet wurden.

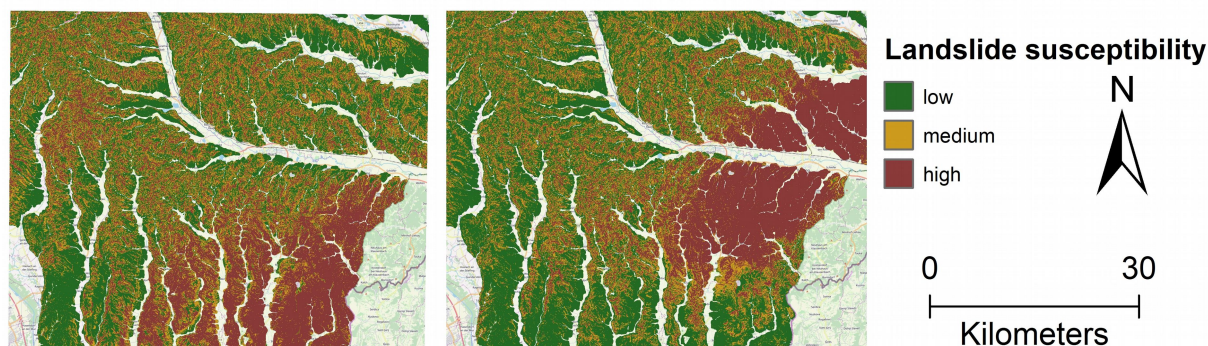


Abbildung 9: Einfluss des simulierten Klimawandels auf die Hangrutschungs-Suszeptibilität gemäß dem RCP8-5 Szenario, für verschiedene Klimaänderungen (links: HadGEM2, rechts: MIROC-ESM).

Tabelle 4: Änderungen in der Fläche der hohen Suszeptibilitätsklasse in der Region Feldbach (Ensemble Median)

	Klima- änderung 1 (HadGEM2)	Klimaänderung 1 + LULCC (HadGEM2)	Klima- änderung 2 (MIROC-ESM)	Klimaänderung 2 + LULCC (MIROC-ESM)
Paris	-1%	-4%	-6%	-8%
RCP8.5	+135%	+132%	+126%	+124%

Abbildung 9 zeigt die Änderungen in der Fläche, die von der höchsten Suszeptibilitätsklasse betroffen ist, Tabelle 4 fasst die Ergebnisse zusammen. Obwohl sich auch hier das Hauptereignis wie im Niederschlag verschiebt, ist eine klare Erhöhung der Suszeptibilität zu erkennen. Unter starken Treibhausgasemissionen (RCP8.5) erwarten wir eine Erhöhung der Fläche um mindestens 120%. Die angenommenen Änderungen in der Landnutzung würden diese Naturgefahr in der Region Feldbach nur marginal reduzieren. Sollte die globale Erwärmung auf 1.5°C begrenzt werden (Pariser Klimaabkommen), wären die Änderungen der Fläche sogar leicht negativ. Dieses Ergebnis überrascht zunächst, da die Niederschlagsänderungen auch für dieses Szenario klar positiv waren. Allerdings ist es möglich, dass leichte Verschiebungen in der Niederschlagsverteilung in den verschiedenen Ensemble-Mitgliedern dazu führten, dass an vielen Orten die Suszeptibilität zwar zunahm, aber bereits zur höchsten Klasse gehörte, dafür an einigen Orten aber abnahm und sich in einer niedrigere Klasse verlagerte.

4.5.6 Delta-Change-basierte Studie des 2014er Ereignisses

Wie eingangs diskutiert, mussten die Entwicklungen für das 2014er Ereignis basierend auf einem einfachen Delta-change Ansatz durchgeführt werden. Dieser wird vor allem in der Hydrologie standardmäßig verwendet. Die Änderungen im Niederschlag (sogenannte Change Factors) wurden hier aus ausgewählten RCMs der EURO-CORDEX Initiative berechnet. Die Berechnungen wurden bereits durchgeführt, bevor entschieden wurde, auch das 1.5°C Ziel zu betrachten.

Tabelle 5: Änderungen in der hohen Suszeptibilitätsklasse für verschiedene Entwicklungen.

	Schwache Klimaänderung	Schwache Klimaänderung + LULCC	Starke Klimaänderung	Starke Klimaänderung + LULCC
Vergan- genheit	-3%	-	-35%	-
RCP8.5	+8%	+5%	+22%	+20%

Tabelle 5 fasst die Ergebnisse für die bedingte Attribution (Vergangenheit) und die zukünftige Entwicklung unter starken Treibhausgasemissionen (RCP8.5) zusammen. In beiden Fällen zeigen die unterschiedlichen betrachteten GCMs sehr unterschiedliche Niederschlagsänderungen. Hingegen ist der Einfluss von Landnutzungsänderungen gering. Die Änderungen wurden basierend auf saisonalen Maxima von 1-Tagesniederschlägen berechnet und bilden deshalb mögliche Änderungen in Gewitter-Niederschlägen, die über das Clausius-Clapeyron Gesetz hinausgehen, nicht ab.

4.6 Private Risikovorsorge gegen Hangrutschungen (AP6)

Der vorwiegend naturwissenschaftliche Fokus von EASICLIM wurde um den Blick auf die Einstellungen und das Verhalten von hangrutschungsgefährdeten Privathaushalten erweitert. Im Mittelpunkt stand dabei die Bestimmung der fördernden und hemmenden Faktoren von Eigenvorsorgeverhalten. Empirische Erkenntnisse in diesem Bereich können dazu beitragen, gefährdete Haushalte gezielt dazu zu motivieren, wirksame Maßnahmen gegen Hangrutschungsrisiken zu setzen. Frühere Forschungsarbeiten im Kontext von Naturgefahren haben bereits gezeigt, dass private Anpassung vor allem von der Risikowahrnehmung und Bewältigungseinschätzung der betroffenen Haushalte abhängt (Kellens et al. 2013). Während sich die Risikowahrnehmung aus der subjektiven Eintrittswahrscheinlichkeit und den erwarteten Auswirkungen einer vorliegenden Bedrohung zusammensetzt, beschreibt die Bewältigungseinschätzung die wahrgenommenen Fähigkeiten und Möglichkeiten, die von der Bedrohung ausgehenden Risiken wirksam zu reduzieren (Bubeck et al. 2013). Diese beiden kognitiven Prozesse – Risikowahrnehmung und Bewältigungseinschätzung – stehen im Zentrum der Schutzmotivationstheorie (PMT), die in der Risikoforschung weite Verbreitung findet. Die erfolgreiche Anwendung der Theorie in Bezug auf geohydrologische Risiken (z. B. Hochwasserrisiken, Grothmann & Reusswig 2006; Zaalberg et al. 2009) legt auch eine Anwendbarkeit im Kontext Hangrutschungen nahe. Demzufolge greift EASICLIM zentrale Bestandteile der Schutzmotivationstheorie heraus, mit dem Ziel das Anpassungsverhalten von hangrutschungsgefährdeten Haushalten zu beschreiben. Dazu wurde eine Reihe sozio-demographischer Merkmale, Einstellungen und Verhaltensintentionen mittels standardisierter Haushaltsbefragung im Gemeindegebiet Feldbach erhoben. Mit geeigneten statistischen Verfahren konnten die Einflussfaktoren privater Risikovorsorge bestimmt werden. Aus den Ergebnissen wurden evidenzbasierte

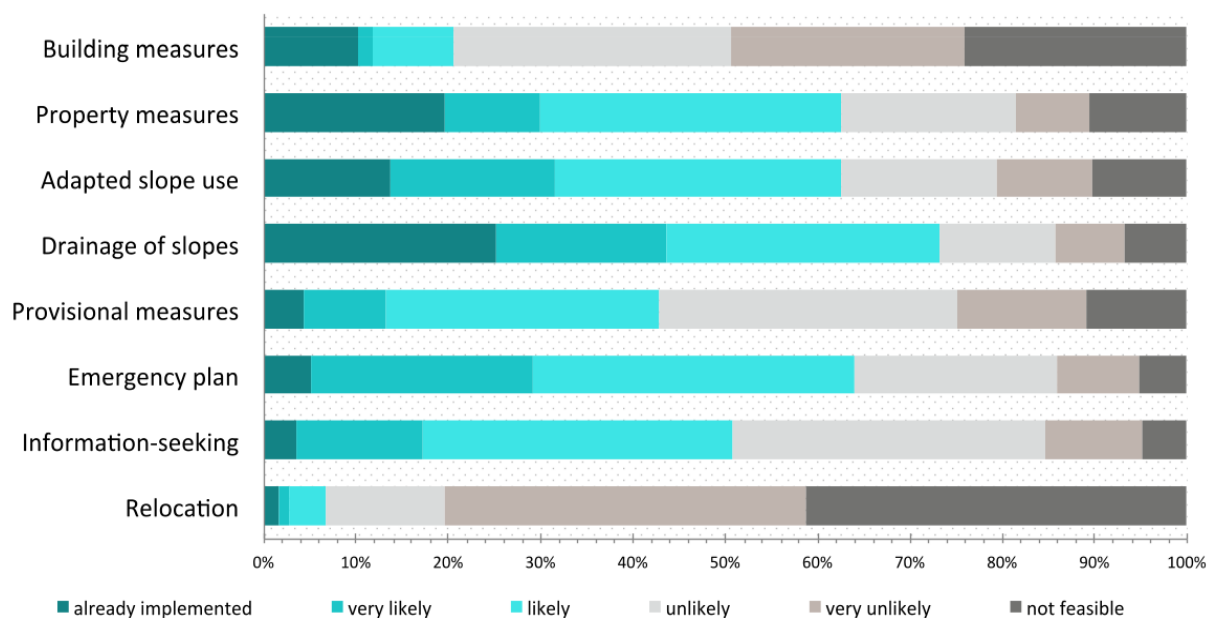
Handlungsempfehlungen für die Stärkung des lokalen Risikomanagements und die Förderung von Eigenvorsorgemaßnahmen abgeleitet.

4.6.1 Methodik

Der Erhebungszeitraum der Haushaltsbefragung erstreckte sich von Februar bis März 2019. Privathaushalte im Gemeindegebiet Feldbach erhielten postalische Fragebögen mit einem beigelegten, vorfrankierten Antwortkuvert. Ein Gewinnspiel mit Warengutscheinen diente als Anreiz zur Teilnahme. Insgesamt wurden 5.212 Fragebögen versandt – alternativ konnte der Fragebogen auch online ausgefüllt werden. Die bereinigte Stichprobengröße beträgt 310 auswertbare Fälle, was einer Rücklaufquote von 6% entspricht.

4.6.2 Bereitschaft zur Eigenvorsorge

Abbildung 10. Bereitschaft zur Eigenvorsorge gegen Hangrutschungen



Die Ergebnisse zeigen, dass erst bei einem kleinen Teil der Befragten Schutzmaßnahmen am eigenen Wohngebäude bzw. Grundstück vorhanden sind, aber durchaus Bereitschaft zur Umsetzung von Maßnahmen besteht (Abb. 10). Die Maßnahme *Abführen von Regenwasser und Entwässerung von Hängen* wurden am häufigsten (25%) umgesetzt, gefolgt von *Veränderungen am Grundstück* (20%) und *angepasster Nutzung gefährdeter Hänge* (14%). Nur knapp 10% der Befragten haben *bauliche Maßnahmen am Gebäude* vorgenommen (z. B. Verstärkung der Bodenplatte, Außenwände). Am seltensten sind die Maßnahmen *Notfallplan für den eigenen Haushalt* (5%), *provisorische Maßnahmen* (4%), *Informationssuche* (4%) und *Umzug in ein sichereres Gebiet* (2%) vorhanden. Hohe Bereitschaft zukünftig Maßnahmen umzusetzen besteht vor allem bei grundstückbezogenen Möglichkeiten (z. B. Abführen von

Regenwasser und Entwässerung) und bei der Erstellung eines haushaltsweiten Notfallplans. Mittlere Bereitschaft zeigt sich bei den Maßnahmen Informationssuche und provisorische Schutzmaßnahmen. Die Umsetzung von baulichen Veränderungen am Gebäude oder Umzug in ein sichereres Gebiet kann sich nur ein kleiner Teil der Befragten vorstellen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Bereitschaft zur Eigenvorsorge je nach Maßnahme stark variiert. Dies liefert wertvolle Hinweise darauf, bei welchen Schutzmaßnahmen eine Umsetzung durch Kommunikations- oder Fördermaßnahmen mit hohen bzw. geringen Erfolgsaussichten erreicht werden kann.

4.6.3 Einflussgrößen

In einem weiteren Schritt wurden die fördernden und hemmenden Faktoren privater Vorsorge bestimmt. Die Auswahl möglicher Einflussgrößen orientierte sich dabei an der Schutzmotivationstheorie, ergänzt mit klassischen sozio-demographischen Merkmalen (Rogers 1975, 1983). Mittels Regressionsanalyse wurde die Relevanz von 14 möglichen Einflussfaktoren auf acht Eigenvorsorgemaßnahmen bestimmt.

Tabelle 6. Einflussgrößen auf die Bereitschaft zur Eigenvorsorge

Factors	Building measures	Property measures	Adapted slope use	Drainage of slopes	Provisional measures	Emergency plan	Information-seeking	Relocation
Age	.02	-.06	.04	.00	-.19***	.01	-.05	-.12
Gender	-.09	-.04	.05	.00	.04	.00	.03	-.06
Income	.14*	.04	.04	.12*	.02	.07	.03	-.06
Landslide experience	.18**	.21***	.11	.10	.02	-.10	.08	-.15*
Risk perception	.04	.07	.07	.02	.10	.05	-.03	-.05
Fear	.08	.03	-.12	.03	-.05	.06	.19**	.17
Response efficacy	.12	-.02	-.01	.05	.25***	.16**	.11	-.10
Response costs	.01	-.04	.07	.08	.26***	.22***	-.01	.04
Self-efficacy	.37***	.42***	.37***	.40***	.13	.36***	.36***	.40***
Perceived responsibility	-.06	.01	.00	-.01	.07	.03	-.09	.10
Reliance on publ. protection	.03	-.07	-.04	.08	.08	.06	-.07	-.11
Denial	.10	.10	-.02	-.07	.00	-.09	-.08	-.02
Information need	.08	.13*	.17**	.13*	.22***	.18**	.26***	-.08
Risk due to climate change	-.02	.09	.10	.07	.06	.07	-.03	-.12
R ² adjusted	.25	.25	.15	.26	.30	.37	.34	.11

Standardised beta coefficients: *p < .10; **p < .05; ***p < .01; sample size varies due to missing values (n = 171 - 177).

Die standardisierten Regressionskoeffizienten und die jeweilige Modellgüte sind in Tabelle 6 dargestellt (n=171-177, erklärte Varianz: 11-37%). Die Ergebnisse deuten auf eine eher geringe Bedeutung sozio-demographischer, aber hohe Relevanz sozialpsychologischer Merkmale hin. Während die Bereitschaft mit provisorischen Maßnahmen vorzusorgen unter älteren Teilnehmer geringer ist ($\beta = -.19$), sind Haushalte mit höherem Einkommen eher dazu bereit, Maßnahmen am Gebäude zu setzen ($\beta = .14$) und Hänge gezielt zu entwässern ($\beta = .12$). Haushalte, die bereits von Hangrutschungen betroffen waren, sind eher dazu bereit, Vorsorgemaßnahmen am Gebäude ($\beta = .18$) oder am Grundstück ($\beta = .21$)

zu ergreifen. Erfahrungen mit Hangrutschungen führen allerdings nicht dazu, dass Haushalte in ein sichereres Gebiet ziehen möchten ($\beta = -.15$). Jene Haushalte, die aufgrund von Hangrutschungen besorgt sind, suchen auch eher nach Informationen zu diesem Thema ($\beta = .19$). Die Einschätzung der Wirksamkeit und Kosten einer Maßnahme beeinflusst die Bereitschaft mit provisorischen Maßnahmen ($\beta = .25$, $\beta = .26$) und Notfallplänen vorzusorgen ($\beta = .16$, $\beta = .22$). Der unerwartete positive Zusammenhang zwischen Maßnahmenkosten und Vorsorgebereitschaft ist möglicherweise ein Hinweis darauf, dass der eingeschätzte Nutzen einer Maßnahme die erwarteten Kosten derselben übersteigt. Die durchgängigsten und stärksten Effekte wurden für Selbstwirksamkeit gefunden: Das Vertrauen in die eigenen Fähigkeiten, Schutzmaßnahmen erfolgreich umsetzen zu können, beeinflusst die Umsetzungsbereitschaft von sieben der acht Maßnahmen ($\beta = .36$ – $.42$). Weiters zeigt sich, dass Haushalte mit Informationsbedarf zum Thema Hangrutschungen eher bereit sind, Vorsorgemaßnahmen zu ergreifen ($\beta = .13$ – $.26$). Der erwartete positive Effekt von Risikobewusstsein kann hingegen nicht bestätigt werden: Höhere Risikowahrnehmung führt nicht zu höherer Umsetzungsbereitschaft. Dieses Ergebnis deckt sich mit anderen Studien in der Naturgefahrenvorsorge, die der Risikowahrnehmung nur geringe motivierende Wirkung attestieren (Bubeck et al. 2012). Die fördernden Faktoren hingegen sind jene, die sich in den oben berechneten Modellen als starke und durchgängige Prädiktoren herausgestellt haben. Dazu zählen insbesondere Erfahrung mit früheren Hangrutschungen, eingeschätzte Maßnahmenwirksamkeit, Selbstwirksamkeit und Informationsbedarf.

4.7 Fotoprojekt, Buch und Ausstellung

Um die Ergebnisse des Projekts einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurde EASICLIM von einem Fotoprojekt begleitet, das von Heike Marie Krause ausgeführt wurde. Nachdem anfängliche Versuche, die Verantwortlichen vor Ort zu kontaktieren, scheiterten, wurde Frau Krause schließlich vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14 Wasserwirtschaft, Ressourcen und Nachhaltigkeit, Bereich Rutschhangsicherung und Landschaftswasserbau, unterstützt. Sie bekam Zugang zum Fotoarchiv der Abteilung und sichtete und kategorisierte etwa 5000 Fotografien der Ereignisse von 2009 und 2014. Außerdem begleitete sie Alois Urbanitsch, verantwortlich für Hangrutschungsschäden in der Region auf acht Fahrten in die Region. Während dieser Fahrten besuchte sie zahlreiche Orte, die 2009 von Hangrutschungen betroffen waren. Insgesamt machte sie etwa 500 Fotos von Orten, die 2009 beschädigt wurden, Schäden von kürzlichen Ereignissen, Schutzmaßnahmen (z.B. Mauern, Drainagen, Auffangbecken), Anzeigern für Hangrutschungen (z.B. verdrehte Bäume, spezielle Pflanzen, die auf feuchten Boden hinweisen, Wellen im Boden, Risse in Häusern), sowie Portraits betroffener Menschen.

Zusätzlich kontaktierte Krause mehr als 50 Personen, die 2009 betroffen waren, und nahm Interviews mit 12 von diesen auf. Die Interviews wurden geschnitten und transskribiert.

Mit diesem Material erstellte Krause einen Buchdummy mit wissenschaftlicher Unterstützung der Projektpartner. Neben einer Auswahl von 100 Fotos zeigt das Buch Erklärungen des wissenschaftlichen Hintergrunds (Hangrutschungen, Einflussfaktoren, das meteorologische Ereignis von 2009, die Modellierungsstudien, deren Ergebnisse) sowie eine Auswahl an Interviews.

Eine Ausstellung mit dem Naturkundemuseum Graz ist geplant. Aufgrund von Umbauarbeiten im Museum wurde diese Ausstellung auf den Dezember 2020 verschoben. Die Eröffnung ist für den 12. Dezember geplant, wenn das Museum seine jährliche Veranstaltung zum Klimawandel abhält.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

5.1 Modellierung der Hangrutschungs-Suszeptibilität (AP 2)

Das Untersuchungsgebiet ist durch zwei Haupttypen von Massenbewegungen gekennzeichnet: permanente tiefgründige Rutschungen und Hangkriechen, sowie spontane flach- bis mittelgründige Rutschungen und Hangmuren. Da für permanente Rutschungen definitionsgemäß kein spezifisches auslösendes Ereignis definiert werden kann und Ereignisdaten damit in die Modellierung nicht einfließen können, wurden diese in EASICLIM nicht bearbeitet.

Die Auswertung der vorhandenen Rutschungsinventare zeigte, dass diese nicht unkritisch in ihrer Gesamtheit übernommen werden können, da vielfach auch stark anthropogen beeinflusste Prozesse oder Prozesse, die weniger dem gravitativen als vielmehr dem fluviatilen Formenkreis zuzuordnen sind, aufgenommen wurden. Weiters ist zu berücksichtigen, dass derartige Inventare fast nie vollständig sind, vor allem, wenn größere Gebiete von den Prozessen betroffen waren. Oft werden auch nur Rutschungen erfasst, die einen relevanten wirtschaftlichen Schaden (z.B. an Straßen oder Gebäuden) verursacht haben, wodurch es zu einer potenziellen Verzerrung des Inventars in Richtung wirtschaftlich „wertvoller“ Objekte und zu weniger Aufzeichnungen in abgelegenen bzw. bewaldeten Gebieten kommen kann.

Eine entsprechende Bearbeitung vorhandener Inventare hinsichtlich ihrer Relevanz (Mindestgröße, Mindestbewegung der Rutschung, geologische Situation) und Zuverlässigkeit ist daher jedenfalls erforderlich.

Bei der Auswahl der Umgebungsparameter zeigte sich, dass die vorhandenen geologischen Kartierungen des Untersuchungsgebiets keine ausreichende Differenzierung der einzelnen Schichten im Hinblick auf die prozessrelevanten geotechnischen und hydrogeologischen Eigenschaften zuließen. Eine Reklassifizierung der ausgewiesenen Einheiten unter Nutzung von Expertenwissen führte zwar zu einer Verbesserung der Ergebnisse, wobei die Bewertung der Variablenbedeutung auf Basis der mittleren Abnahme der erklärten Abweichung (% mDD) zeigte, dass die Lithologie im Modell dennoch keine große Rolle spielt.

Diese Bewertung zeigte jedoch die große Bedeutung der meteorologischen und LULC-Variablen: der 5-Tagesniederschlag war die wichtigste Variable, gefolgt von der Variablen Wald. Auch die maximale dreistündige Niederschlagsintensität rangierte unter den fünf bedeutendsten Variablen.

Die Performance-Ergebnisse auf Grundlage der Kreuzvalidierung in Raum und Zeit zeigten im Durchschnitt akzeptable bis hervorragende Werte. Die Verwendung des gesamten Variablensatzes ergab signifikant höhere Schätzungen als Modelle, die nur Geländemerkmale verwendeten. Auch die Modellierung mit kombinierten Auslöseereignissen führte zu besseren Ergebnissen und ist daher für die Erstellung eines allgemeinen Gefährdungsmodells gegenüber der Modellierung mit Einzelereignissen zu bevorzugen.

5.2 Ereignis-Entwicklungen (Storylines, AP 3+4)

Simulationen von meteorologischen Ereignissen unter verschiedenen klimatologischen Bedingungen („Event Storylines“, hier als Ereignis-Entwicklungen bezeichnet) sind ein neues Forschungsfeld. Sie wurden hervorgehoben als ein Ansatz, um Unsicherheiten durch interne Klimavariabilität zu eliminieren, detaillierte Prozessstudien auf Ereignisbasis durchzuführen, und um besser an die Erfahrungen von Entscheidungsträgern anknüpfen zu können, indem sich auf ein reales Ereignis bezogen wird.

In diesem Projekt haben wir vielfältige Erfahrungen in der Erstellung solcher Storylines gewonnen, die relevant für die internationale Forschungsgemeinschaft sind, insbesondere in Bezug auf den konkreten Modellierungsansatz und die Definition von Klimaänderungen. Wir planen ein Paper um diese Herausforderungen zu veranschaulichen, das sich sowohl an die Wissenschaft als auch an Nutzer (Klimafolgenmodellierer, Entscheidungsträger) richtet.

Eine wichtige Einschränkung ist die Tatsache, dass sehr lokalisierte Ereignisse eventuell nicht in ein anderes Klima übertragbar sind, einfach weil bestimmte regionale Faktoren das Ereignis räumlich verschieben. Zum Beispiel sind die starken Änderungen im Niederschlag des 2009er Ereignisses sehr deutlich sichtbar, wenn die gesamte betrachtete Region (oder sogar der gesamte Ostalpenraum) berücksichtigt wird, insbesondere für das RCP 8.5 Szenario. Aber die Zielregion um Feldbach ist so klein, dass die Hangrutschungs-Suszeptibilität schon durch kleine räumliche Verlagerungen der wichtigsten Niederschlagscluster beeinflusst wird. Wir berücksichtigen dieses Problem, indem wir nur Randbedingungen betrachten, die zu kleinen Verlagerungen führen.

Ein möglicher alternativer Ansatz könnte die Kombination von hochauflösender Modellierung mit einem Delta-Change Ansatz sein. Ein wichtiger Nachteil eines herkömmlichen Delta-Change Ansatzes, angewendet auf Standard-GCMs oder RCMs ist, dass diese Modelle möglicherweise relevante kleinskalige Prozesse nicht auflösen, die lokale Klimaänderungen bestimmen. Weiters kann das Klimaänderungssignal abhängig von der Zeitskala sein, wie aus den unterschiedlichen Änderungen im maximalen 3-Stunden Niederschlag und im 5-Tages Niederschlag ersichtlich ist. Deshalb könnten alternativ Change Factors aus den hochauflösenden Klimasimulationen berechnet werden, um kleinräumige Prozesse möglichst gut abzubilden. Diese Change Factors könnten separat für den maximalen 3-Stunden Niederschlag und den 5-Tages Niederschlag berechnet werden, um so eine mögliche Skalenabhängigkeit zu berücksichtigen. Um Verschiebungen im meteorologischen Ereignis zu eliminieren sollten diese Change Factors nicht individuell für jede Gitterbox erstellt werden, sondern jeweils ein Change Factor pro Indikator für die gesamte Fläche. Wir gehen allerdings davon aus, dass unsere Ergebnisse robust sind, da die gesamte Intensivierung des Niederschlags die Verschiebung überwiegt.

5.3 Einfluss des Klimawandels auf das Wetterereignis (AP3+4)

Wir konnten einen klaren Einfluss des Klimawandels auf die thermodynamischen Aspekte des Wetterereignisses von 2009 feststellen. Ohne den Klimawandel wäre das Ereignis zwischen 15% bis 27% weniger intensiv gewesen, je nach Ausprägung des Klimawandels und betrachteter Zeitskala. Im schlimmsten Fall, repräsentiert durch das RCP8.5 Szenario, könnte der 5-Tages Niederschlag zwischen 20% und mehr als 40% zunehmen, der maximale 3-Stunden Niederschlag sogar mehr.

Sollte die Begrenzung des Klimawandels wie im Pariser Klimaabkommen festgelegt auf 1.5°C gelingen, würde die Intensität des Ereignisses deutlich weniger zunehmen. Änderungen in der atmosphärischen Zirkulation scheinen eine untergeordnete Rolle zu spielen. Dieses Ergebnis bestätigt auch, dass sowohl die bedingte Attribution als auch der Pseudo-Global-Warming Ansatz zulässig sind.

Anstelle regionale Klimaänderungen für verschiedene Emissionsszenarien darzustellen, werden diese mehr und mehr auf verschiedene globale Erwärmungs-Level bezogen (z.B. 3°C, 4°C, oder wie im Pariser Abkommen noch 0.5°C). Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass Unsicherheiten in der globalen Klimasensitivität eliminiert werden, und die Änderungen bezogen auf Temperaturziele kommuniziert werden. Für anstehende Publikationen planen wir, die Ergebnisse entsprechend aufzubereiten.

5.4 Einfluss von Klimawandel und Landnutzungsänderungen auf die Hangrutschungs-Suszeptibilität (AP5)

Unsere Studie zeigt einen klaren Einfluss von Klimawandel und Landnutzungsänderungen auf die Stärke des 2009er Hangrutschungs-Ereignisses. Ohne Klimawandel wäre die von hoher Suszeptibilität betroffene Fläche zwischen 5% und 15% kleiner gewesen, und für das RCP8.5 Szenario würde diese Fläche um 126% - 133% zunehmen. Die positiven Effekte entschiedener Klimaschutzpolitik sind ebenfalls deutlich sichtbar: sollte das Pariser 1.5°C Ziel eingehalten werden, würde der weitere Einfluss des Klimawandels auf das Ereignis im wesentlichen verschwinden. Das betrachtete Szenario der Landnutzungsänderung dämpft die Änderungen in der Region Feldbach nur marginal, jedoch ist der Effekt für das gesamte betrachtete Gebiet deutlich stärker (wohl weil die angenommenen Änderungen in der Region Feldbach klein sind).

Diese Ereignisse können Entscheidungsträgern vor Ort helfen, den Klimawandel in lokale Risikoanalysen und Anpassungspläne einfließen zu lassen. Außerdem bieten sie weiteres Hintergrundwissen für die nationale Klimaschutzstrategie.

Idealisierte Landnutzungsszenarien könnten weiter helfen, den Einfluss von Wald und proaktivem Landnutzungsmanagement auf das Hangrutschungsrisiko zu verstehen.

5.5 Private Schutzmaßnahmen gegen Hangrutschungen (AP6)

Die Haushaltsbefragung hat gezeigt, dass private Schutzmaßnahmen gegen Hangrutschungen erst in geringem Ausmaß umgesetzt sind. Die am häufigsten umgesetzte Maßnahme ist das gezielte Abführen von Regenwasser und die Entwässerungen von Hängen. Kostenintensivere Maßnahmen, wie etwa bauliche Veränderungen am Gebäude, sind kaum vorhanden. Aber auch einfache und kostengünstige Maßnahmen, wie regelmäßige Informationssuche oder ein haushaltsweiter Notfallplan, wurden bis dato selten umgesetzt. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass eine grundlegende Bereitschaft vorhanden ist, zukünftig Maßnahmen zu setzen. Dies gilt für den Großteil der Maßnahmen, ausgenommen bauliche Veränderungen am Gebäude und Umzug in ein sichereres Gebiet.

Insgesamt deutet der geringe Umsetzungsgrad darauf hin, dass der Schutz vor Hangrutschungen nach wie vor als öffentliche Aufgabe gesehen wird. Für eine stärkere Beteiligung von Privathaushalten im Sinne eines integrativen Risikomanagements sollten gezielt jene Maßnahmen gefördert werden, für die eine Umsetzung am wahrscheinlichsten ist bzw. für die bereits eine hohe grundlegende Bereitschaft vorhanden ist. Aus den Ergebnissen lassen sich vier vielversprechende Kandidaten identifizieren: (1) Veränderungen am Grundstück, (2) angepasste Nutzung gefährdeter Hänge, (3) Abführen von Regenwasser/Entwässerung und (4) Notfallplan für den eigenen Haushalt. Interventionen und Anreize im lokalen Risikomanagement sollten sich gezielt auf die Förderung dieser Maßnahmen konzentrieren, vorausgesetzt natürlich, dass die Maßnahmen in den jeweiligen Anwendungsfällen auch über ein entsprechendes Potential an Schadensreduktion verfügen.

Die Ergebnisse aus EASICLIM liefern außerdem Hinweise darauf, welche konkreten Faktoren bei der Aktivierung zur Eigenvorsorge berücksichtigt werden sollen. Die Bereitschaft provisorische Maßnahmen zu setzen sinkt mit zunehmendem Alter. Möglicherweise fällt es älteren Menschen im Akutfall schwerer, physisch anstrengende Vorkehrungen unter hohem Zeitdruck zu setzen. Für das lokale Risikomanagement bedeutet das, ältere Bewohner bei provisorischen Vorkehrungen zu unterstützen oder diese zu permanenten (anstelle provisorischer) Maßnahmen zu motivieren. Weiters zeigt sich, dass Maßnahmen am Gebäude und Entwässerung von Hängen eher bei einkommensstarken Haushalten zu finden sind. Offenbar werden diese Maßnahmen als besonders kostspielig eingestuft. Die Umsetzung dieser Maßnahmen kann daher am ehesten über finanzielle Anreize angestoßen werden. Denkbar sind beispielsweise Förderungen für private Vorsorgemaßnahmen oder eine Reduktion von Versicherungsbeiträgen beim Vorhandensein effektiver Schutzmaßnahmen (Stichwort: risikobasierte Prämie). Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass Haushalte, die bereits Hangrutschungen erlebt haben, eher zur Umsetzung von Maßnahmen bereit sind. Möglicherweise können „stellvertretende“ Erfahrungen genützt werden, um jene Haushalte zur Eigenvorsorge zu motivieren, die noch nicht von Hangrutschungen betroffen waren. Dies kann beispielsweise durch aktiv gestalteten Erfahrungsaustausch zwischen Betroffenen und Nicht-Betroffenen erreicht werden (z. B. über Vereine, Freiwillige Feuerwehren oder von der Gemeinde initiierte Veranstaltungen).

Aktiver Erfahrungsaustausch kann auch dazu beitragen, die wahrgenommene Wirksamkeit von privaten Schutzmaßnahmen – ein weiterer wichtiger Einflussfaktor – zu evaluieren. Weiters kann die Wirksamkeit von Vorsorgemaßnahmen bei Einsatzübungen veranschaulicht werden (ähnlich wie bei Brandlöschübungen der lokalen Feuerwehr), oder indem Beispiele gelungener Eigenvorsorge an Wohnobjekten in der Nachbarschaft oder in der Region vorgestellt werden. Am greifbarsten wäre die Demonstration von konkreten Schutzmaßnahmen (Vorteile/Nachteile, Wirksamkeit, Kosten) durch Fachleute im Rahmen einer Vor-Ort-Beratung, direkt am Gebäude bzw. Grundstück des betroffenen Haushalts. Als weiterer zentraler Einflussfaktor erwies sich Selbstwirksamkeit, also das Vertrauen in die eigene Handlungskompetenz. Selbstwirksamkeit kann durch eigene oder stellvertretende Erfahrungen gestärkt werden (siehe oben), aber auch dadurch, dass sich Haushalte „Nahziele“ setzen – also beispielsweise in einem ersten Schritt einfache Schutzmaßnahmen ergreifen – und damit erkennbare Verbesserungen erzielen. Schließlich hat sich auch der Informationsbedarf als einflussreicher Faktor herausgestellt. Das lokale Risikomanagement kann auf den Informationsmangel der Haushalte reagieren, indem Informationen zu Hangrutschungen und Schutzmaßnahmen leicht zugänglich gemacht werden, oder an Haushalte, die in Risikogebieten wohnen, gezielt herangetragen werden (push statt pull). Ein integrativer Ansatz geht aber sogar noch über die passive Informationsbereitstellung hinaus, und bindet gefährdete Haushalte in einer aktiven, beratenden oder mitentscheidenden Rolle in den Katastrophenschutz ein.

C) Projektdetails

6 Methodik

6.1 Statistisches Hangrutschungsgefährdungsmodell

Besonders flachgründige Rutschungen zeigen eine hohe Sensitivität sowohl für die räumliche und zeitliche Verteilung von Niederschlägen als auch für die Niederschlagsintensität, die Niederschlagsdauer und die Vorbefeuchtung (Crosta & Frattini 2001). Ein Algorithmus, der die Niederschlagsereignisse rekonstruiert, die Niederschlagsbedingungen, die zu Rutschungen geführt haben, identifiziert, und die Dauer und die akkumulierten Niederschläge für die Ereignisse berechnet, wurde von Melillo et al. (2015) vorgeschlagen. Der Algorithmus ist unabhängig von lokalen Rahmenbedingungen und verwendet einen reduzierten Satz von Parametern, um unterschiedliche physikalische Situationen berücksichtigen zu können. Die Niederschlagsereignisse zum Zeitpunkt der Rutschungen wurden nach diesem automatisierten Ansatz extrahiert.

Eine Übersicht über aussagekräftige Umgebungsparameter für die Modellierung von Rutschungen geben van Westen et al. (2008). Über die Analyse der Suszeptibilität auf lokaler bis regionaler Ebene und die erfolgreiche Anwendung der wichtigsten Prädiktoren wurde wiederholt publiziert (z.B. Goetz et al. 2011, Petschko et al. 2014). Auf dieser Grundlage wurden morphologische Parameter (LSV), meteorologische Variablen, Lithologie und Landnutzung/Landbedeckung (LULC) mit den im ereignisbasierten Inventar erfassten Rutschungen verknüpft.

Die Abgrenzung der LSV basierte auf dem Laserscan-Geländemodell: Hangexposition, Konvergenzindex (100 und 500 m Radius), Hangkrümmung, Fließakkumulation, normierte Höhe, Hangneigung, Einzugsgebietsneigungswinkel, topographischer Positionsindex (TPI) und topographischer Feuchtigkeitsindex wurden berechnet. Die Lithologie wurde in fünf Einheiten ausgewiesen, die Variable Waldbedeckung bestand aus vier Klassen. Die Berechnung der meteorologischen Variablen basierte auf den INCA-Niederschlagsdaten. Hier wurden zwei Parameter extrahiert: (1) 5-Tagesniederschlag vor dem Ereignisdatum und (2) die maximale dreistündige Niederschlagsintensität zum Zeitpunkt der Auslösung der Rutschung.

Für die statistische Gefährdungsmodellierung wurde ein innovatives Bezugssystem entworfen, um die Rutschungsanfälligkeit mit Hilfe generalisierter additiver Modelle (GAM) zu bewerten. Die Vorteile der statistischen Gefährdungsmodellierung liegen v.a. in der Objektivität des Ansatzes, wobei gewisse subjektive Einflussnahmen nach wie vor enthalten sind, v.a. bei der (expertengesteuerten) Auswahl der Eingangsfaktoren.

Generalisierte additive Modelle haben sich für vergleichbare Analysen und Modellierungen bereits in der Vergangenheit bewährt (siehe z.B. Goetz et al. 2011, Vorpahl et al. 2012, Petschko et al. 2014, Brenning et al. 2015). Die

Methode der GAM stellt eine Weiterentwicklung der logistischen Regression dar. Der Vorteil ist, dass lineare und nichtlineare Zusammenhänge zwischen abhängiger Variable und den unabhängigen Variablen (z.B. Variablen zur Topographie) kombiniert werden können. Daraus resultiert eine bessere Flexibilität und Ausrichtung des Modells anhand der verfügbaren Eingangsdaten.

Da für die statistische Modellierung sowohl Beobachtungen für das Vorhandensein als auch für das Fehlen von Rutschungen erforderlich sind, mussten zuverlässige Beobachtungen für das Fehlen von Erdrutschen festgelegt werden, wobei für die Ereignisse von 2009 und 2014 unterschiedliche Strategien angewendet wurden.

Bei den Rutschungsdaten der GBA wurde angenommen, dass die Schwerpunktgebiete vollständig kartiert wurden. Das Gebiet außerhalb eines empirisch festgelegten Puffers von 140 m um jeden Rutschungspunkt wurde als stabil eingestuft. Als äußere Begrenzung wurde eine konvexe Hülle um die Rutschungspunkte gelegt. Bei den IMG-Daten war davon auszugehen, dass in der Umgebung der aufgenommenen Rutschungen weitere nicht gemeldete Rutschungen existierten. Anzunehmen war, dass alle entlang der befahrenen Strecke sichtbaren Rutschungen aufgezeichnet wurden. Um das inventarisierte Gebiet abzugrenzen, wurde daher eine Viewshed-Analyse entlang einer hypothetisch gefahrenen Route durchgeführt. Für das finale Straßennetz wurde mit Open Source Routing Machine OSRM die kürzeste Strecke noch einmal befahren, wobei an jeder Rutschungslokalität zwei alternative Wege vorgesehen waren. Basierend auf dem endgültigen Routing-Ergebnis wurde die "effektiv untersuchte Fläche" mit dem Ansatz von Bornaetxea et al. (2018) extrahiert. Viewpoints wurden alle 200 m entlang des endgültigen Straßennetzes platziert und Viewsheds mit einem Betrachtungsabstand bis 1000 m berechnet. Für die finale rutschungsfreie Maske wurde die rutschungsfreie GBA-Maske mit der "effektiv untersuchten Fläche" verknüpft. So genannte triviale Bereiche (z.B. flache Talböden) und anthropogene Strukturen mit ähnlichen geomorphometrischen Charakteristika wie Rutschungen (z.B. Steinbrüche) wurden aus der finalen Maske eliminiert.

Um eine rutschungsfreie Maske für das Ereignis 2014 zu erstellen, wurde die Tatsache genutzt, dass die Aufzeichnungen des Landes Steiermark ausschließlich auf gemeldeten Schäden basieren, die als sanierungswürdig eingestuft wurden. Basierend auf OpenStreetMap (OSM) - Daten wurde eine „Infrastrukturmaske“ (Gebäude, Straßen, Eisenbahnen) und eine „Landwirtschaftsmaske“ (Wein- und Obstgärten) erstellt, die das potentiell betroffene Gebiet bestimmen. „Triviale Bereiche“ wurden auch hier aus der rutschungsfreien Maske eliminiert. Schließlich wurde die Maske ohne Rutschungen auf Basis einer „Einzugsgebietsmaske“ (von Rutschungen betroffene Einzugsgebiete und ihre Nachbarn) weiter eingeschränkt, um die allgemeine Verteilung von Rutschungen im Steirischen Becken zu berücksichtigen.

Für die Ereignismodellierung wurden Einzelereignis- (GAM-09, GAM-14) und kombinierte Ereignis- (GAM-Co) Modelle ("ereignisbasierte Modelle") erstellt. Für Unterschiede in den Eingangsvariablensätzen wurden Modelle mit dem gesamten Variablensatz (GAM-Co) mit denen, die nur Geländeattribute verwenden (LSV und

Lithologie) verglichen. Um die Unterschiede auf Signifikanz zu testen, wurde ein paarweiser t-Test angewandt ($\alpha=0.05$, Konfidenzniveau 95%, Alternative: größer) und die effektive Größe r gemäß Cohen 1965 berechnet.

Die Modellvalidierung erfolgte auf Basis der Kreuzvalidierung in Raum (SpCV) und Zeit (SpTempCV) sowie der Berechnung der Fläche unter der *Receiver Operating* – Kurve (AUROC, Interpretation nach Hosmer et al. 2013) als Qualitätsmaß. Bei SpCV wird das Modell auf k Unterregionen kalibriert und für jeden Fall das Auftreten von Rutschungen für die übrigen Regionen vorhergesagt. Für die SpTempCV wird das Modell auf ein Ereignis (z.B. Ereignis 2009) kalibriert und für die Vorhersage des anderen Ereignisses (z.B. Ereignis 2014) verwendet. Für die "Vergleichsmodelle" wurden identische Trainings- und Validierungsdaten im gesamten SpCV berücksichtigt (SpCV-Vergleich). Für die Beurteilung der Modellgüte wurde das 100-fache der spezifischen Ereignisdaten auf ein 1:1 Verhältnis von Anwesenheit bzw. Abwesenheit von Rutschungen und k auf 5 mit jeweils 5 Wiederholungen (d.h. insgesamt 2500 Modelle) gesetzt.

Für die Bewertung der Variablen wurde die Bedeutung der Variablen anhand der mittleren Abnahme der erklärten Abweichung (% mDD), der Odds Ratios (OR, Szumilas 2010) und der (CSF - Component smooth function) Plots untersucht.

Aus Vergleichsgründen wurde die statistische Modellierung durch ein prozessbasiertes Modell unter Verwendung der Software SINMAP 2.0 (Stability Index MAPping) ergänzt (Pack et al., 2005). Das in SINMAP angewandte hydrologische Modell basiert auf der Infiltrationsrate und der Materialdurchlässigkeit. Verschiedene Niederschlagsszenarien wurden durch Variation der Infiltrationswerte modelliert, um die effektive Infiltration für eine kritische Periode zu quantifizieren. Da die Transmissivität stark von der Mächtigkeit der mobilisierbaren Schicht abhängt, wurde dieser Parameter GIS-basiert nach Akumu et al. (2016) modelliert. Informationen über die Stabilität eines Hanges werden in Form eines Sicherheitsfaktors (SI) ausgedrückt. Diese Sicherheitsfaktoren sind jedoch nur indikativ (Pack et al. 2005).

Um Klimaszenarien in das Gefährdungsmodell zu integrieren, wurden die Maxima von 5-Tages-Niederschlag und 3-Stunden-Intensität (INCA-Daten) während der beiden Ereignisperioden (21.-24.06.2009; 12.-15.09.2014) für jedes Pixel mittels eines beweglichen Fensters definiert. Die Klimainformationen wurden unter Verwendung der lokalen inversen Distanzgewichtung mit 16 berücksichtigten Nachbarpunkten auf eine Auflösung von 10 m interpoliert. Anschließend wurden die INCA-Daten im GAM mit den Daten der Realisierungen ausgetauscht und Vorhersagen berechnet.

Für die Modellierung der Suszeptibilität unter Berücksichtigung von Umweltveränderungen wurde ein räumlicher Bootstrap-Ansatz entwickelt, um der Unsicherheit in der Beziehung zwischen den meteorologischen Variablen und dem Auftreten von Rutschungen Rechnung zu tragen und Unterschiede in der Signifikanz zu analysieren.

6.2 Bedingte Attribution und Ereignis-Entwicklungen

Im wesentlichen existieren zwei Ansätze der Ereignis-Attribution, um Wetterereignisse dem Klimawandel zuzuordnen: weit verbreitet ist die Standardform, in der Ensembles von Simulationen globalen Klimamodellen mit und ohne menschengemachten Klimawandel erstellt werden, und verglichen wird, wie häufig Ereignisse wie das zu untersuchende jeweils vorkommen, wie stark sich also die Auftrittswahrscheinlichkeit verändert (z.B. Stott et al., 2004). Häufig sind jedoch Klimaänderungen stark von natürlichen Schwankungen überlagert, so dass sich der Einfluss des Klimawandels nicht feststellen lässt. Außerdem werden kleinräumige Extremereignisse von globalen Klimamodellen nur unzureichend dargestellt, ebenso wie Wetterlagen, die zu Extremereignissen führen. Deshalb wurde vor einigen Jahren die bedingte Attribution vorgeschlagen (Trenberth et al., 2015), die direkt das beobachtete Extremereignis bei unveränderter Wetterlage simuliert, allerdings unter abgeschwächtem oder fortgeschrittenem Klimawandel. Dieser Ansatz setzt voraus, dass thermodynamische Faktoren (z.B. erhöhte Temperaturen, erhöhte Luftfeuchtigkeit und dadurch intensivere Niederschläge) den Einfluss des Klimawandels auf das Ereignis dominieren, und Änderungen in der atmosphärischen Zirkulation, also dem Auftreten von Wetterlagen, nicht ausschlaggebend sind. Die Vorteile dieses Ansatzes sind, dass er durch das Festhalten der Wetterlage den Einfluss natürlicher Schwankungen eliminiert und, da nur ein Ereignis simuliert werden muss, sehr hoch auflösende Simulationen erlaubt, die es ermöglichen, das Ereignis sehr realistisch darzustellen.

Im EASICLIM Projekt wurde der Ansatz der bedingten Attribution gewählt, um hochauflösende Simulationen zu ermöglichen, die regionale Prozesse realistisch beschreiben. Es wurde dabei angenommen, dass Wetterlagen, die vergleichbare Ereignisse auslösen, in dieser Form auch in Zukunft über dem Adriaraum auftreten werden. Frühere Studien zeigen, dass sich sowohl in der direkten Analyse beobachteter Ereignisse (Nieto et al., 2008) als auch in der Analyse von beobachteten Blocking Ereignissen, die häufig zusammen mit abgeschnürten Höhentiefs auftreten (Woollings et al., 2018), keine robusten Trends finden lassen. In EASICLIM haben wir zusätzlich Veränderungen im Auftreten von Vb Wetterlagen untersucht (siehe Abschnitt 4.4.3). Es zeigte sich, dass CMIP-5 Modelle für das RCP8.5 nur eine unwesentliche Änderung in der Häufigkeit dieser Zyklonen simulieren, Änderungen für den bisher beobachteten, viel schwächeren Klimawandel also vernachlässigbar sind. Diese Ergebnisse zeigen, dass der Klimawandel vor allem Niederschlagsintensitäten beeinflusst hat, und dass der Ansatz der bedingten Attribution gerechtfertigt ist. Hätte sich eine Veränderung der Wetterlagenhäufigkeit ergeben, hätte diese zusätzlich zur bedingten Attribution in eine Gesamtbetrachtung mit einbezogen werden müssen (Shepherd, 2016).

Eine entsprechende Argumentation gilt auch für die zukünftigen Ereignis-Entwicklungen (Storylines, Shepherd et al., 2018). Anstelle von kontrafaktischen vergangenen Ereignissen werden hier jedoch mögliche zukünftige Ereignisse betrachtet.

6.3 Simulation der Ereignis-Entwicklungen

Für die Simulation der Ereignis-Entwicklungen sowohl in der Vergangenheit (bedingte Attribution) als auch der Zukunft wurde das RCM „Consortium for Small-scale Modeling“ (COSMO) model in CLimate Mode oder CCLM (früher COSMO-CLM; Böhm et al., 2006; Rockel et al., 2008) in einer horizontalen Auflösung von 3km genutzt. Dieses Modell simuliert Tiefenkonvektion explizit und stellt deshalb insbesondere Gewitter realistischer dar als RCMs in einer Standardauflösung (Prein et al., 2015; Kendon et al., 2017).

Ursprünglich war geplant, die gesamten meteorologischen Vorbedingungen, wie zum Beispiel die Feuchteaufnahme, der beiden Ereignisse unter verschiedenen klimatischen Bedingungen explizit zu simulieren. Dieser Ansatz würde ein großes Modellierungsgebiet erfordern, das Westeuropa, Mittel- und Osteuropa sowie das nördliche Mittelmeer umfasst. In so einem großen Modellierungsgebiet können sowohl zufällige Wettervariabilität als auch kleine systematische Modellfehler das betrachtete meteorologische Ereignis – hier die Starkniederschläge in der Südoststeiermark – so stark räumlich verschieben, dass letztendlich das beobachtete und das simulierte Ereignis nicht mehr als dasselbe Ereignis interpretiert werden können. Sogenanntes Spectral Nudging (von Storch, 2000) zwingt die Simulation über dem Simulationsgebiet der beobachteten großskaligen Wetterentwicklung zu folgen. Im Fall des Ereignisses von 2009 verschob sich jedoch trotz Spectral Nudging das in der Zukunft simulierte Niederschlags-Ereignis weit nach Slowenien.

Daher musste ein anderer Modellierungsansatz mit einem kleineren Simulationsgebiet (nur der Ostalpenraum) gewählt werden, so dass sich das Ereignis nicht so stark verschieben konnte. Die Herausforderung dieses Ansatzes ist es, plausible Änderungen in den Randbedingungen zu formulieren, die die Änderung in der Temperatur und Feuchtigkeit der Atmosphäre während eines vergleichbaren Ereignisses beschreiben.

Die Berechnung dieser Änderungen ist im Abschnitt 4.4.1. erläutert. Häufig wird in solchen Pseudo-Globalwarming Studien angenommen, dass die relative Feuchtigkeit konstant bleibt (Schaer et al., 1996), jedoch zeigen Modellprojektionen, dass dies im allgemeinen vor allem über Land nicht der Fall ist. Ebenfalls ist die häufige Annahme, dass die Temperaturschichtung unverändert bleibt (Schaer et al., 1996) in der Regel nicht erfüllt. Es wurden deshalb verschiedene Simulationen durchgeführt, teils mit sehr unterschiedlichen Änderungen im resultierenden Niederschlag. Als plausibel wurde schließlich ein Setting gewählt, bei dem sowohl die Temperatur als auch die relative Feuchte für jede Schicht der Atmosphäre separat, sowie Bodendruck angepasst werden (siehe Abschnitt 4.4.1).

Damit die Bodenfeuchte im RCM zu Beginn der Simulationsperiode in einem eingeschwungenen Zustand ist, wurden zusätzlich 9 Monate Spin-Up Simulationen für die Gegenwart und die jeweiligen Entwicklungen simuliert. Hierzu wurden die Randbedingungen mit den klimatologischen mittleren Änderungen der jeweiligen Jahreszeit, separat für alle Schichten, modifiziert.

6.4 Bestimmung der Einflussfaktoren auf private Schutzmaßnahmen

Für die Bestimmung der Einflussfaktoren auf private Vorsorge gegen Hangrutschungen wurde die Schutzmotivationstheorie herangezogen. Gemäß der Theorie werden Schutzentscheidungen durch das Abwägen des Risikos gegen den erwarteten Nutzen von Schutzmaßnahmen getroffen (Rogers 1975, 1983). Im Zentrum stehen die zwei kognitiven Prozesse *Risikowahrnehmung* (Kombination aus subjektiv eingeschätzter Eintrittswahrscheinlichkeit und erwartetem Schaden) und *Bewältigungseinschätzung* (Kombination aus subjektiv eingeschätzter Maßnahmenwirksamkeit, Kosten und Selbstwirksamkeitswahrnehmung). Die Schutzmotivationstheorie wurde ausgewählt, da zentrale Elemente dieser Theorie bereits erfolgreich für die Erklärung von Verhalten in anderen Naturgefahrenbereichen eingesetzt wurde (z. B. *Hochwasser*, Grothmann & Reusswig 2006; *Wirbelstürme*, Peacock et al. 2005; *Erdbeben* Lindell & Perry 2000; *Waldbrände*, Martin et al. 2009). EASICLIM erweitert das Spektrum nun um eine weitere Risikokategorie mit dem Ziel, Vorsorgeverhalten von hangrutschungsgefährdeten Haushalten zu erklären.

Der in EASICLIM gewählte Ansatz folgt dem psychometrischen Paradigma, der Risiko als subjektives Konzept begreift: „Risk does not exist ‘out there’, independent of our minds and cultures, waiting to be measured“ (Slovic 1992). Psychometrische Risikoforschung geht davon aus, dass sowohl Risiko als auch psychologische, soziale, institutionelle und kulturelle Faktoren durch geeignete Messinstrumente quantifiziert werden können (Sjöberg et al. 2004). Ausgehend von Studien in ähnlichen Risikobereichen wurden in EASICLIM folgende Konzepte im Rahmen einer standardisierten Haushaltsbefragung operationalisiert:

- | | |
|------------------------------------|--|
| • Erfahrungen mit Hangrutschungen | • Verantwortungszuschreibung |
| • Kognitive Risikowahrnehmung | • Risiko durch Klimawandel |
| • Affektive Risikowahrnehmung | • Informationsbedarf |
| • Eigenvorsorgemaßnahmen | • Risikoleugnung |
| • Vertrauen in öffentlichen Schutz | • Akzeptanz öffentlicher Schutzmaßnahmen |
| • Medienpräsenz von Rutschungen | • Sozio-demographische Merkmale |

Standardisierte Haushaltsbefragungen haben sich in der psychometrischen Naturgefahrenforschung als verbreitetes Erhebungsinstrument erwiesen (siehe Bamberg et al. 2017). Vor diesem Hintergrund wurde im Zeitraum Februar bis März 2019 eine gemeindeweite standardisierte Befragung im Fallstudiengebiet Feldbach durchgeführt. Als Population wurde die gesamte Gemeindebevölkerung festgelegt. Der Streuplan wurde über das Service der Österreichischen Post „Info.Post Gemeindestreuung“ erstellt, um mögliche Streuverluste zu vermeiden. Insgesamt wurden 5.212 Fragebögen versandt. Die postalischen Fragebögen enthielten einen Link zu einem identischen Online-Fragebogen als alternative Teilnahmemöglichkeit. Ein Gewinnspiel mit Warengutscheinen diente als Anreiz zur Teilnahme. Die Teilnahme am Gewinnspiel setzte die Angabe von Adressdaten voraus. Dadurch konnten eventuelle Duplikate zwischen postalischer

und Online-Befragung ausgeschlossen werden. Die endgültige Stichprobengröße belief sich nach Plausibilitätsprüfung und Bereinigung der Daten (Entfernung von Duplikaten und Fällen mit fehlenden Werten) auf insgesamt 310 auswertbare Fälle, was einer Rücklaufquote von 6% entspricht.

Die Stichprobe stimmt in Bezug auf die erhobenen Personen- und Haushaltsmerkmale mit der Grundgesamtheit gut überein (Tabelle 7). Haushalte mit männlichen und älteren Auskunftspersonen sowie einkommensschwächere Haushalte sind verglichen mit der Population allerdings leicht überrepräsentiert. Die Ergebnisse sind daher nicht uneingeschränkt generalisierbar. Etwa 27% der Befragten geben an, mindestens einmal von Hangrutschungen betroffen gewesen zu sein.

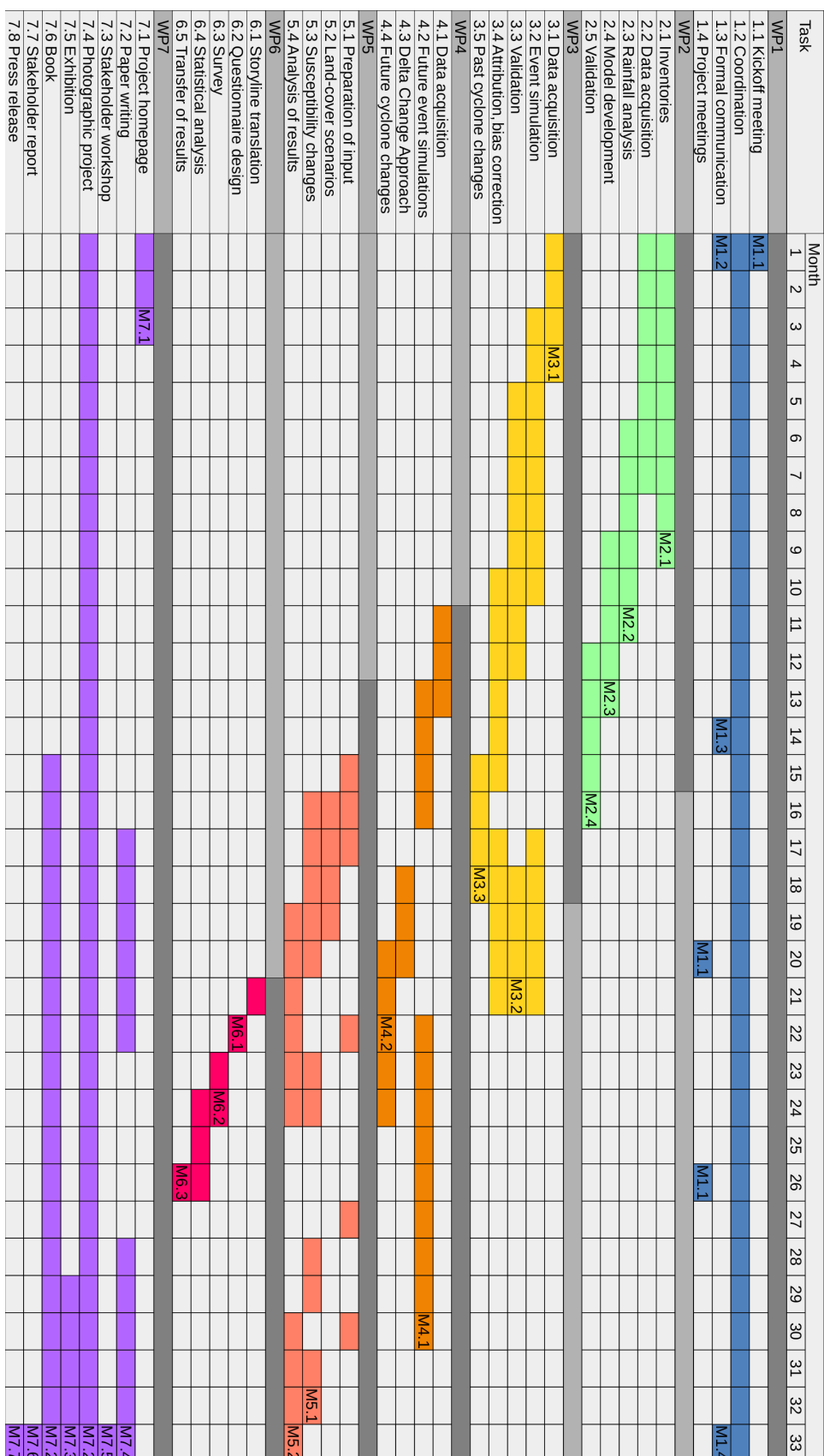
Tabelle 7. Stichprobenzusammensetzung und Populationsdaten

	Gender	Age (years)						Household income (€)					Landslide experience
	female	18-32	33-47	48-62	63-77	≥78	<1,200	1,200-1,799	1,800-2,899	2,900-4,399	4,400-6,000	>6,000	yes
Sample	36%	10%	25%	34%	27%	4%	7%	17%	29%	25%	6%	2%	27%
Population	51%	21%	24%	29%	17%	9%	~25%	~25%	~25%	~25%	~25%		n. a.

Population data for gender and age refer to the municipality Feldbach (Statistics Austria 2019. Population at the beginning of the year since 2002 / regional status of 2019); Population data for income refer roughly to the quartiles of the Austrian income distribution (Statistics Austria 2017. Microcensus Labour Force and Housing Survey, EU-SILC Community Statistics on Income and Living Conditions).

Die Einflussfaktoren auf die Vorsorgebereitschaft wurden mittels Regressionsanalyse bestimmt. Sozio-demographische Faktoren wurden als Einzelitems verrechnet, sozial-psychologische Faktoren wo möglich als Mittelwertindizes (z. B. Risikowahrnehmung wurde als kombinierter Faktor aus wahrgenommener Eintrittswahrscheinlichkeit und erwarteten Schäden verrechnet). Insgesamt wurden acht unterschiedliche Vorsorgemaßnahmen auf 14 Prädiktoren regressiert. Die durch die Modelle erklärte Varianz beträgt bis zu 37%. Ähnliche Modelle, die etwa für die Erklärung von Risikowahrnehmung verwendet werden, erreichen üblicherweise eine erklärte Varianz von 20-25% (Sjöberg 2004). Für die Ergebnisinterpretation wurden nur Einflussfaktoren herangezogen, die mindestens ein Signifikanzniveau von $p < .10$ erreichten. Koeffizienten wurden in standardisierter Form berichtet, um eine Vergleichbarkeit der Effektstärken zu gewährleisten.

7 Arbeits- und Zeitplan



8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Publikationen in begutachteten wissenschaftlichen Journalen

- Babcicky, P. Determinants of private landslide preparedness: The role of risk perception and coping appraisal. In preparation.
- Ban, N., et al. (incl. D. Maraun and H. Truhetz). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, Part I: Evaluation of precipitation. Submitted to Clim. Dynam.
- Knevels, R., H. Petschko, H. Proske, P. Leopold, D. Maraun and A. Brenning. Event-based Landslide Modeling in the Styrian Basin, Austria: Accounting for Time-Varying Rainfall and Land Cover, Geosciences, accepted.
- Knevels, R. H. Petschko, H. Proske, A.N. Mishra, D. Maraun and A. Brenning, Landslide susceptibility prediction in a changing environment. Comparison of statistical-probabilistic tools in the Styrian Basin. To be submitted to Water.
- Mishra, A.N., D. Maraun, H. Truhetz, R. Knevels, E. Bevacqua, H. Proske, H. Petschko, P. Leopold and A. Brenning. The contribution of anthropogenic climate change to the 2009 severe rainfall and landslide event in Austria. To be submitted to Env. Res. Lett.
- Maraun, D., A.N. Mishra, R. Knevels, H. Truhetz, E. Bevacqua, G. Zappa, H. Proske, H. Petschko, P. Leopold, A. Brenning. The severe rainfall and landslide event from summer 2009 in Austria in possible future climates. To be submitted to Nat. Clim. Change.
- Maraun, D., A.N. Mishra, E. Bevacqua and H. Truhetz. Challenges in simulating event storylines for informing local-scale climate risk assessments. To be submitted to Clim. Change.
- Pichelli, E.; et al. (incl. H. Truhetz and A.N. Mishra). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: future precipitation projections. Submitted to Clim. Dynam.

Vorträge und Poster

- Bevacqua, E., M. Piazza, A.N. Mishra, D. Maraun, H. Truhetz, and M. Lichtenstern. Climate change's influence on June 2009 extreme precipitation event over southeast Austria. Paestum, Italy. 2019 [oral].
- Bevacqua, E., M. Piazza, D. Maraun, and H. Truhetz. An attempt to estimate the climate change effect on the June 2009 Austrian extreme event based on the storyline approach. Lisbon. 25.11.2018 [oral].

- Knevels, R.; Proske, H.; Leopold, P.; Petschko, H.; & Brenning, A. Modeling past and future landslide occurrences after extreme weather events in the Styrian basin, Austria. EGU General Assembly, April 2018 [poster].
- Maraun, D., Challenges in Regional Climate Research. International Symposium of Hydrological Sciences and High-efficiency Water Resources Utilization under the Changing Environment, Wuhan University. 25.10.2019 [invited oral].
- Maraun, D., Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. University of Vienna. 30.09.2019 [invited oral].
- Maraun, D., Weather and Climate Extremes in a Changing Climate. University of Hamburg. 20.06.2019 [invited oral].
- Maraun, D., Storylines of a future precipitation extreme event - what is the event, what are the storylines, and are they sensible? Workshop on physical modeling supporting a "storyline approach", CICERO, Oslo. 24.04.2019 [invited oral].
- Maraun, D., Inferring future changes in regional precipitation extremes by means of dynamical and statistical modeling. MedClivar Conference, Belgrade. 19.09.2018 [invited oral].
- Maraun, D., Understanding regional weather extremes in a changing climate. Klimacampus Hamburg. 12.07.2018 [invited oral].
- Maraun, D., H. Proske, P. Leopold, A. Brenning, H. Petschko, M. Piazza, M. Avian, R. Knevels, and H. Truhetz. Eastern Alpine Slope Instabilities under Climate Change (EASICLIM) – First Results. 19. Österreichischer Klimatag, Salzburg, 24.4.2018 [oral].
- Mishra, A.N., D. Maraun, H. Truhetz, R. Knevels, E. Bevacqua, H. Proske, H. Petschko, P. Leopold and A. Brenning. Climate Change's Influence on June 2009 Extreme Precipitation Event Over Southeast Austria, EGU General Assembly, Vienna 2020 [oral].
- Mishra, A.N., D. Maraun, H. Truhetz, R. Knevels, E. Bevacqua, H. Proske, H. Petschko, P. Leopold and A. Brenning. The contribution of anthropogenic climate change to the 2009 severe rainfall and landslide event in Austria. Understanding intensification of short-duration rainfall extremes meeting at Chicheley Hall, UK, 6.2.2020 [invited oral].
- Mishra, A. N., Truhetz, H., & Goergen, K. Evaluation of the precipitation diurnal cycle in WRF CORDEX-FPS hindcasts & climate change's influence on the Austrian test case. CORDEX-FPS Annual Meeting 2019, Toulouse, France, 27.11.2019 [oral].
- Mishra, A. N., E. Bevacqua, D. Maraun, H. Truhetz, M. Piazza, and M. Lichtenstern. Climate change's influence on June 2009 extreme precipitation event over southeast Austria. Woods Hole Oceanographic Institution. 2019 [oral].

Piazza, M., and D. Maraun, Conditional attribution of an extreme event of precipitation in Austria in June 2009: a modelling approach with COSMO-CLM at convection-permitting resolution. EGU2018-16739, Vienna, Austria, 2018 [poster].

Truhetz, H. Fallbeispiel: Extremereignisse im Klimawandel (in German). Austrian Disaster Research Days 2019, Graz, Austria, 14.10.2019 [oral].

Buch

Maraun, D. & H.M. Krause. Opok – Klimawandel und Hangrutschungen in der Steiermark. In Vorbereitung.

Ausstellung

H.M. Krause & D. Maraun. Opok – Klimawandel und Hangrutschungen in der Steiermark. In Vorbereitung mit dem Naturkundemuseum des Universalmuseum Joanneum Graz. Geplant im Steiermarksaal mit einem 40 m² Relief der Steiermark. Projektionen der Resultatekarten auf das Relief, Fotoprojektionen, kurzes Video von Wasser, das in einem Brunnen vibriert, Audioaufzeichnungen von Interviews, Präsentation der wissenschaftlichen Resultate.

Stakeholder Bericht

Maraun, D., H. Proske, R. Knevels, P. Leopold, H. Petschko, A. Brenning, H. Truhetz, A.N. Mishra. Der Einfluss von Klimawandel und Landnutzungsänderungen auf die Hangrutschungsereignisse in der Südoststeiermark von 2009 und 2014, Wegener Center Research Briefs, in Vorbereitung.

Literatur

- Akumu, C.E., Woods, M., Johnson, J.A., Pitt, D.G., Uhlig, P., & McMurray, S. (2016). GIS-fuzzy logic technique in modeling soil depth classes: Using parts of the Clay Belt and Hornepayne region in Ontario, Canada as a case study. In: *Geoderma* 283, 78–87.
- APCC (2014). Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 Seiten. ISBN 978-3-7001-7699-2.
- Bamberg, S., Masson, T., Brewitt, K., & Nemetschek, N. (2017). Threat, coping and flood prevention – A meta-analysis. *Journal of Environmental Psychology*, 54, 116–126.
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal statistical society: series B (Methodological)*, 57(1), 289–300.
- Böhm, U., Kücken, M., Ahrens, W., Block, A., Hauße, D., Keuler, K., ... & Will, A. (2006). CLM—the climate version of LM: brief description and long-term applications. *COSMO newsletter*, 6, 225–235.
- Brenning, A., Schwinn, M., Ruiz-Páez, A. P., & Muenchow, J. (2015). Landslide susceptibility near highways is increased by 1 order of magnitude in the Andes of southern Ecuador, Loja province. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 15(1).
- Bornaetxea, T., Rossi, M., Marchesini, I., & Alvioli, M. (2018). Effective surveyed area and its role in statistical landslide susceptibility assessments. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(9), 2455–2469.
- Bubeck, P., Botzen, W. J. W., & Aerts, J. C. J. H. (2012). A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior. *Risk Analysis*, 32(9), 1481–1495.
- Bubeck, P., Botzen, W. J. W., Kreibich, H., & Aerts, J. C. J. H. (2013). Detailed insights into the influence of flood-coping appraisals on mitigation behaviour. *Global Environmental Change*, 23(5), 1327–1338.
- Cochran, W. G. (1977). Sampling techniques-3.
- Cohen, J. (1965). Some statistical issues in psychological research. *Handbook of clinical psychology*, 95–121.
- Crosta, G.B., & Frattini, P. (2001). Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. In: *Proceedings 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms* (Mugnai A, Guzzetti F, Roth G, eds). Siena: 463–487.
- Goetz, J. N., Guthrie, R. H., & Brenning, A. (2011). Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. *Geomorphology*, 129(3–4), 376–386.
- Goetz, J., Brenning, A., Marcer, M., & Bodin, X. (2018). Modeling the precision of structure-from-motion multi-view stereo digital elevation models from repeated close-range aerial surveys. *Remote sensing of environment*, 210, 208–216.

- Grothmann, T., & Reusswig, F. (2006). People at risk of flooding: Why some residents take precautionary action while others do not. *Natural Hazards*, 38(1), 101-120.
- Gustafsson, M., Rayner, D., & Chen, D. (2010). Extreme rainfall events in southern Sweden: where does the moisture come from?. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 62(5), 605-616.
- Hahsler, M., & Hornik, K. (2007). TSP-Infrastructure for the traveling salesperson problem. *Journal of Statistical Software*, 23(2), 1-21.
- Hofstätter, M., Chimani, B., Lexer, A., & Blöschl, G. (2016). A new classification scheme of European cyclone tracks with relevance to precipitation. *Water Resources Research*, 52(9), 7086-7104.
- Hofstätter, M., Lexer, A., Homann, M., & Blöschl, G. (2018). Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types. *International Journal of Climatology*, 38, e497-e517.
- Hornich R., and Adelwöhrer R. (2010), Landslides in Styria in 2009 / Hangrutschungs-ereignisse 2009 in der Steiermark. *Geomechanics and Tunnelling* 3, 455-461.
- Hosmer Jr, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression* (Vol. 398). John Wiley & Sons.
- Kellens, W., Terpstra, T., & De Maeyer, P. (2013). Perception and communication of flood risks: A systematic review of empirical research. *Risk Analysis*, 33(1), 24-49.
- Kendon, E. J., Ban, N., Roberts, N. M., Fowler, H. J., Roberts, M. J., Chan, S. C., ... & Wilkinson, J. M. (2017). Do convection-permitting regional climate models improve projections of future precipitation change?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 79-93.
- Lindell, M. K., & Perry, R. W. (2000). Household adjustment to earthquake hazard a review of research. *Environment and Behavior*, 32(4), 461-501.
- Luxen, D., & Vetter, C. (2011). Real-time routing with OpenStreetMap data. In *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems* (pp. 513-516).
- Martin, W. E., Martin, I. M., & Kent, B. (2009). The role of risk perceptions in the risk mitigation process: The case of wildfire in high risk communities. *Journal of Environmental Management*, 91(2), 489-498.
- Melillo, M., Brunetti, M. T., Peruccacci, S., Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2015). An algorithm for the objective reconstruction of rainfall events responsible for landslides. *Landslides*, 12(2), 311-320.
- Messmer, M. B., Gomez, J. J., & Raible, C. (2015). Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe. *Earth system dynamics*, 6(2), 541-553.

- Nieto, R., Sprenger, M., Wernli, H., Trigo, R. M., & Gimeno, L. (2008). Identification and Climatology of Cut-off Lows near the Tropopause. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1), 256-290.
- Nissen, K. M., Ulbrich, U., & Leckebusch, G. C. (2013). Vb cyclones and associated rainfall extremes over Central Europe under present day and climate change conditions. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 649-660.
- Pack, R.T., Tarboton, D.G., Goodwin, C.N., & Prasad, A. (2005). SINMAP User's Manual. A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping. www.engineering.usu.edu/dtarb/sinmap.html.
- Peacock, W. G., Brody, S. D., & Highfield, W. (2005). Hurricane risk perceptions among Florida's single family homeowners. *Landscape and Urban Planning*, 73(2-3), 120-135.
- Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Luciani, S., Vennari, C., & Guzzetti, F. (2012). Lithological and seasonal control on rainfall thresholds for the possible initiation of landslides in central Italy. *Geomorphology*, 139, 79-90.
- Petschko, H., Brenning, A., Bell, R., Goetz, J., & Glade, T. (2014). Assessing the quality of landslide susceptibility maps--case study Lower Austria. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 14(1).
- Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, G., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., ... & Brisson, E. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of geophysics*, 53(2), 323-361.
- Rockel, B., Will, A., & Hense, A. (2008). The regional climate model COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), 347-348.
- Rogers, R. W. (1975). A protection motivation theory of fear appeals and attitude change. *Journal of Psychology*, 91(1), 93-114.
- Rogers, R. W. (1983). Cognitive and physiological processes in fear appeals and attitude change: A revised theory of protection motivation. In J. T. Cacioppo & R. Petty (Eds.), *Social Psychophysiology: A Sourcebook* (pp. 153-176). London: Guilford.
- Schär, C., Frei, C., Lüthi, D., & Davies, H. C. (1996). Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophysical Research Letters*, 23(6), 669-672.
- Schüler, S., Grabner, M., Karanitsch-Ackerl, S., Fluch, S., Jandl, R., Geburek, T., & Konrad, H. (2013). Fichte - fit für den Klimawandel? *BFW-Praxisinformation* 31: 10 - 12.
- Schweigl, J., & Hervas J. (2009). Landslide Mapping in Austria (*JRC Scientific and Technical Reports No. EUR 23785 EN*). Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission, Ispra, Italy.
- Shepherd, T. G. (2016). A common framework for approaches to extreme event attribution. *Current Climate Change Reports*, 2(1), 28-38.

Shepherd, T. G., Boyd, E., Calel, R. A., Chapman, S. C., Dessai, S., Dima-West, I. M., ... & Senior, C. A. (2018). Storylines: an alternative approach to representing uncertainty in physical aspects of climate change. *Climatic change*, 151(3-4), 555-571.

Sjöberg, L., Moen, B.-E., & Rundmo, T. (2004). Explaining risk perception: An evaluation of the psychometric paradigm in risk perception research. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, Department of Psychology.

Slovic, P. (1992). Perception of risk: Reflections on the psychometric paradigm. In S. Krimsky & D. Golding (Eds.), *Social Theories of Risk* (pp. 117-152). Westport: Praeger.

Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J., Cohen, M. D., & Ngan, F. (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077.

Szumilas, M. (2010). Explaining odds ratios. *Journal of the Canadian academy of child and adolescent psychiatry*, 19(3), 227.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498.

Trenberth, K. E., Fasullo, J. T., & Shepherd, T. G. (2015). Attribution of climate extreme events. *Nature Climate Change*, 5(8), 725-730.

UNISDR (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. United Nations International Strategy for Disaster Reduction.

Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering geology*, 102(3-4), 112-131.

von Storch, H., Langenberg, H., & Feser, F. (2000). A spectral nudging technique for dynamical downscaling purposes. *Monthly weather review*, 128(10), 3664-3673.

Vorpahl, P., Elsenbeer, H., Märker, M., & Schröder, B. (2012). How can statistical models help to determine driving factors of landslides? *Ecological Modelling*, 239: 27-39.

Woollings, T., Barriopedro, D., Methven, J., Son, S. W., Martius, O., Harvey, B., ... & Seneviratne, S. (2018). Blocking and its response to climate change. *Current climate change reports*, 4(3), 287-300.

Zaalberg, R., Midden, C., Meijnders, A., & McCalley, T. (2009). Prevention, adaptation, and threat denial: Flooding experiences in the Netherlands. *Risk Analysis*, 29(12), 1759-1778.

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.