

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

**„Extreme gravitative Massenbewegungen im
österreichischen Alpenraum –
Auswirkungen des Klimawandels und Strategien
präventiver Maßnahmen“**

verfasst von / submitted by

Nihal Önder, BEd

Angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien 2021 / Vienna 2021

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

UA 199 510 525 02

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB)
Lehrverbund UF Geographie und Wirtschaftskunde
Lehrverbund UF Psychologie und Philosophie

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade

Eidesstaatliche Erklärung

„Hiermit erkläre ich, die vorgelegte Arbeit selbständig verfasst und ausschließlich die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben. Alle wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommenen Textpassagen und Gedankengänge sind durch genaue Angabe der Quelle in Form von Anmerkungen bzw. in-Text-Zitationen ausgewiesen. Dies gilt auch für Quellen aus dem Internet, bei denen zusätzlich URL und Zugriffsdatum angeführt sind. Mir ist bekannt, dass jeder Fall von Plagiat zur Nicht-Bewertung der gesamten Lehrveranstaltung führt und der Studienprogrammleitung gemeldet werden muss. Ferner versichere ich, diese Arbeit nicht bereits andernorts zur Beurteilung vorgelegt zu haben.“

Wien, am 05.06.2021

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Danksagung	VI
Kurzzusammenfassung	VII
Abstract	VIII
1. Einleitung und Zielsetzung.....	1
2. Forschungsfragen und Hypothesen.....	2
3. Methodik	2
4. Theoretische Grundlagen	3
4.1 Gravitative Massenbewegungen	3
4.1.1 Klassifikation.....	5
4.2 Naturgefahren.....	8
4.3 Naturrisiken	9
4.4 Naturkatastrophen	10
4.5 Extremereignisse	10
4.6 Klimawandel	11
4.7 Risikomanagement.....	12
5. Gravitative Massenbewegungen	13
5.1 Aktivitätsstatus.....	13
5.2 Geschwindigkeit und Schadensausmaß.....	15
5.3 Ursachen	16
5.3.1 Destabilisierende Faktoren	17
5.3.2 Exogene Faktoren	17
5.3.3 Endogene Faktoren	20
5.4 Auswirkungen	21
5.4.1 Auswirkungen auf den Menschen.....	22
5.4.2 Sach- und Gebäudeschäden	22
5.4.3 Kritische Infrastrukturen.....	23
5.4.4 Überlastfälle.....	24
5.5 Häufigkeit und Intensität von Ereignissen.....	24
6. Gravitative Massenbewegungen im Alpenraum	25
6.1 Sturzereignisse.....	25
6.1.1 Bergsturz	25
6.1.2 Felssturz	26
6.1.3 Steinschlag.....	28
6.2 Rutschungen	28

6.2.1 Rutschungstypen.....	30
6.2.2 Rutschungsarten.....	33
6.3 Muren	34
7. Klimawandel	36
7.1 Klimaänderungen im Allgemeinen	37
7.2 Einfluss des Klimawandels auf Extremereignisseim Alpenraum.....	38
7.2.1 Einfluss des Klimawandels auf Permafrost, Schnee- und Eisschmelze.....	40
7.2.2 Einfluss des Klimawandels auf Steinschlag, Felssturz, Bergsturz, Kippung	41
7.2.3 Einfluss des Klimawandels auf Rutschungen und Muren	42
7.3 Klimaszenarien für Österreich und den Alpenraum	42
8. Extremereignisse im Alpenraum	45
8.1 Fallbeispiele.....	45
8.1.1 Prähistorische Ereignisse	45
8.1.2 Historische Ereignisse	46
8.1.3 Aktuelle Ereignisse	48
8.2 Schäden durch alpine Naturkatastrophen.....	49
9. Präventionsmaßnahmen bei gravitativen Massenbewegungen.....	49
9.1 Derzeitige Schutzmaßnahmen	49
9.1.1 Gefahrenzonenplan	50
9.1.2 Monitoring.....	52
9.1.3 Frühwarnsysteme	54
9.1.4 Aktuelle Projekte.....	55
9.2 Förderungsmanagement	56
9.3 Risikomanagement.....	57
9.4 Risikoanalyse	58
9.4.1 Restrisiko.....	58
9.5 Schadensprävention	59
9.5.1 Vulnerabilität und Resilienz	59
9.6. Herausforderung und Handlungsbedarf.....	61
10. Diskussion	63
11. Zusammenfassung	66
12. Ausblick	68
Literaturverzeichnis	73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterschiedliche Typen gravitativer Massenbewegungen (Quelle: GLADE ET ZANGERL 2019: 375)	5
Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Felssturzes (Quelle: HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 7)	26
Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Rotationsrutschung (Quelle: HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 11)	30
Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Translationsrutschung (Quelle: HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 13)	31
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Murgangs (Quelle: HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 17)	34
Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung und Zunahme von Muren (Quelle: KAITNA ET AL. 2019: 494)	36
Abbildung 7: Einfluss der Erwärmung auf die Wahrscheinlichkeit extremer Ereignisse. (Quelle: PERKINS-KIRKPATRICK ET PITMAN 2018: 2)	40
Abbildung 8: Gemessene vergangene und zukünftige erwartete Jahresmitteltemperaturen in Österreich. (Quelle: OLEFS ET FORMAYER 2021: 30)	44
Abbildung 9: Kreislauf des Katastrophenmanagements nach ÖNORM (Quelle: RUDOLF-MIKLAU 2018: 8)	50
Abbildung 10: Ein Beispiel für eine Gefahrenzonenkarte. (Quelle: BMLRT 2021: o.S.)	51
Abbildung 11: Datenaufzeichnung (Monitoring). (Quelle: HÜBL ET MIKOS 2014: 63)	53
Abbildung 12: Auflistung der Methoden, die zum Monitoring von Massenbewegungen zum Einsatz kommen. (Quelle: BMLRT 2019: 13)	54
Abbildung 13: Relation von Vulnerabilität und Resilienz (Quelle: FUCHS ET KEILER 2016: 51)	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifikationssystem nach Varnes (Quelle: DIKAU ET GLADE 2002).....	6
Tabelle 2: Aktivitätsstatus gravitativer Massenbewegungen (Quelle: CRUDEN ET VARNES 1996).....	13
Tabelle 3: Geschwindigkeitsklassen und Schadensausmaß gravitativer Massenbewegungen (Quelle: BELL ET AL. 2010)	15

Danksagung

Ich bedanke mich herzlichst bei Herrn Univ. Prof. Dr. Thomas Glade für die Hilfestellung bezüglich Themensuche und für unkomplizierte und wertvolle Betreuung meiner Masterarbeit.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Familie, meinen Freunden und meinem Freund, die mich immer unterstützt haben.

Ebenso bedanke ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen, die mir während meiner Bearbeitungszeit nützliche Tipps gegeben haben.

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Aspekten gravitativer Massenbewegungen im Alpenraum, den Auswirkungen des Klimawandels und Strategien präventiver Maßnahmen. Um diese besser verstehen zu können, wird der Aktivitätsstatus gravitativer Massenbewegungen und das Klassifikationsschemata bezüglich Intensität, Geschwindigkeit und Schadensausmaß beschrieben. Ebenso werden verschiedene Ursachen für das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen, die in dispositive, prozessauslösende und kontrollierende Faktoren eingeteilt werden, veranschaulicht. Die vielfältigen Folgen von Ereignissen, die sich auf den Menschen, auf Güter, auf die kritischen Infrastrukturen oder auf die Gesellschaft und Wirtschaft auswirken, spielen ebenso eine wichtige Rolle.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit ist der Zusammenhang des Klimawandels mit dem Auftreten extremer gravitativer Massenbewegungen. In der Arbeit werden gravitative Massenbewegungen im Alpenraum, wie Sturzereignisse, Rutschungen und Muren, im Detail beschrieben. Anschließend werden die relevantesten Klimaveränderungen, die einen Einfluss auf den Alpenraum haben, veranschaulicht und mögliche Klimaszenarien für den österreichischen Alpenraum vorgestellt.

Zudem nehmen die derzeitigen Schutzmaßnahmen in Österreich, die eine Eindämmung von gravitativen Massenbewegungen im Alpenraum gewährleisten und somit zum Schutz der Bevölkerung beitragen, eine zentrale Rolle ein. Es wird gezeigt, dass es keinen 100%igen Schutz gegenüber Extremereignissen gibt, da mit Restrisiken gerechnet werden muss.

Zusammenfassend werden für einen besseren Umgang mit Extremereignissen Beispiele historischer und gegenwärtiger Phänomene, sowie Handlungsbedarfe und Herausforderungen repräsentiert.

Abstract

This thesis deals with the aspects of gravitational mass movements in the Austrian Alpine region, the effects of climate change and strategies of the current prevention mechanisms. For a better understanding, the activity status of gravitational mass movements and the classification scheme regarding intensity, velocity and extent of damage are described. Likewise, various causes for the occurrence of gravitational mass movements, classified into dispositive, process-triggering, and controlling factors, are illustrated. The multiple consequences of events that affect people, critical infrastructure and the economy also play an important role.

Another focus of thesis is the context between climate change and the occurrence of extreme gravitational mass movements. Therefore, gravitational mass movements in the Alpine region, such as fall events, landslides and debris flows, are described in detail. Subsequently, the most relevant climate changes that have an impact on the Alpine region are illustrated and possible climate scenarios for the Austrian Alpine region are presented.

In addition, the current prevention mechanisms in Austria, which ensure the containment of gravitational mass movements in the Alpine region and thus contribute to the protection of the population, take a central role in this thesis. It is shown that there is no 100% protection against extreme events, as residual risks have to be expected.

In summary, examples of historical and present phenomena, as well as needs for action and challenges are represented for a better handling of extreme events.

1. Einleitung und Zielsetzung

Die Alpen zählen zu den schönsten und zugleich den gefährlichsten Naturräumen Europas. Seit die Menschen begonnen haben, den Alpenraum als Dauersiedlungsraum zu verwenden, sind sie auch mit Folgen der auftretenden Naturgefahren konfrontiert. Diese nehmen weltweit dramatisch zu und verursachen immer größere Schäden. (vgl. PATEK 2007: 5) Der Klimawandel bzw. die extremen Wetterereignisse, die vor allem den Alpenraum betreffen, sind hauptsächlich für den ansteigenden Trend verantwortlich (vgl. HÖPPE 2008: 111). Das Auftreten potentiell schadenbringenden Ereignissen und die daraus resultierenden Schäden und Konsequenzen verändert unsere Umwelt und spielt eine große Rolle für unsere Gesellschaften.

Ein besonderes Augenmerk der vorliegenden Arbeit wird auf die Risikoanalyse, Frühwarnsysteme und Schutzmechanismen gelegt. Obwohl durch umfangreiche Schutzmaßnahmen ein hohes Maß an Sicherheit erreicht werden konnte, verändert die intensive Nutzung des menschlichen Lebensraumes das Risiko für das Auftreten gravitativer extremer Ereignisse. Außerdem kann kein 100%iger Schutz für die Gesellschaft und Wirtschaft gewährleistet werden. (vgl. WEISS 2003: 4) Die Dokumentation von auftretenden Ereignissen im Endbericht von Extrema stellt eine besonders wichtige Grundlage für das Management der Risiken möglicher extremer Ereignisse in der Zukunft dar und ermöglicht die Veranschaulichung von Zukunftsprognosen.

Das Ziel der Arbeit ist es, einen Überblick über verschiedene Aspekte wie Ursachen, Folgen, Schäden und Gefahren von extremen gravitativen Massenbewegungen zu geben. Es soll geforscht werden, inwiefern die Auswirkungen des Klimawandels das Auftreten von Extremereignissen begünstigen.

Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeit ist die Beschreibung der derzeitigen Schutzmechanismen und Präventionsmaßnahmen. Die Arbeit geht besonders auf die Herausforderungen und auf den Handlungsbedarf dieser ein und widmet sich der Frage, inwieweit diese den Schutz der Gesellschaft sicherstellen. Abschließend soll

die Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Hypothesen Fazit, sowie mit einer Diskussion möglicher Perspektiven abgerundet werden.

2. Forschungsfragen und Hypothesen

Im Zuge der Masterarbeit sollen folgende Hypothesen und Forschungsfragen behandelt werden:

Hypothese 1: *Die Auswirkungen des Klimawandels und die veränderten klimatischen Bedingungen begünstigen das Auftreten von Extremereignissen.*

- Wie wirkt sich der Klimawandel auf den Alpenraum aus?
- Begünstigen die veränderten klimatischen Bedingungen das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen und Extremereignissen?

Hypothese 2: *Präventionsmechanismen und Frühwarnsysteme bieten nicht ausreichend Schutz für die Gesellschaft.*

- Welche Präventionsmaßnahmen und Frühwarnsysteme gibt es für den österreichischen Alpenraum?
- Bieten Präventionsmechanismen und Frühwarnsysteme ausreichend Schutz vor Extremereignissen für die Gesellschaft?
- Besteht ein Handlungsbedarf und wo gibt es Lücken?
- Wie gut ist Österreich auf alpine Extremereignisse vorbereitet?

3. Methodik

Die wissenschaftlichen Fragestellungen und Hypothesen sollen mittels systematischer Literaturanalyse ausgearbeitet und beantwortet werden. Zu Beginn wurde eine computerbasierte Literatursuche im elektronischen Bestand der Universität Wien (u:search) und mit Hilfe von verschiedenen Suchmaschinen wie Google-Scholar, Scopus und Researchgate durchgeführt. Zuerst wurden alle thematisch relevanten Ergebnisse berücksichtigt. Da es aber nicht einfach war, die geeignete Literatur zu finden, wurden die Treffer mittels vorab definierten Ein- und Ausschlusskriterien erheblich reduziert, sodass nur jene Ergebnisse übrigblieben, die für die Fragestellungen relevant waren. Im Rahmen dieser Literatursuche wurden

Peer-Reviewed Journals, Artikel, Hochschulschriften und Bücher, sowie in deutscher, als auch in englischer Sprache berücksichtigt. Ebenso herangezogen sind periodisch erscheinende Werke wie Fachzeitschriften, sowie wissenschaftliche Zeitungen und Magazine. Die wichtigste Grundlage für diese Masterarbeit bildet der Endbericht über den aktuellen Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich von ExtremA, verfasst von Prof. Thomas Glade, Prof. Martin Mergili und Prof. Karin Sattler.

Bei der Onlineliteraturrecherche wurden folgende Schlüsselbegriffe in den Bestand eingegeben: Natural hazards, Extreme Events, Austria, Climate Change, Alps, Extremereignisse, Naturgefahren, Österreich, Alpen, Klimawandel, Auswirkungen. Die verwendeten Schlüsselbegriffe wurden miteinander kombiniert.

Nach einer erfolgreichen Literaturrecherche wurde eine intensive Literaturlauswertung durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurde die Betrachtung von wissenschaftlichen Quellen sowie deren Inhalte im Hinblick auf bestimmte Fragestellungen und Hypothesen berücksichtigt. Der Zweck dieser Literaturlauswertung ist das Herausfiltern des aktuellen Wissensstands, um daraus Forschungslücken ableiten zu können. Schließlich habe ich das Thema eingegrenzt und mithilfe einer intensiven Literaturrecherche und Literaturlauswertung die vorliegende Arbeit verfasst.

4. Theoretische Grundlagen

Dieser Abschnitt widmet sich der Bestimmung theoretischer Grundlagen wichtiger Fachbegriffe um ein besseres Verständnis zu ermöglichen und vorab Unklarheiten zu verhindern. Neben den Definitionen, die die Leserin und den Leser in die Thematik einführen soll, wird ein Überblick mit den wichtigsten zusammenhängenden Informationen verschaffen. Das folgende Kapitel umfasst Definitionen der Begriffe „gravitative Massenbewegungen“, „Naturgefahren“, „Naturrisiken“, „Naturkatastrophen“, „Extremereignisse“, „Klimawandel“ und „Risikomanagement“.

4.1 Gravitative Massenbewegungen

Gravitative Massenbewegungen spielen sowohl eine zentrale Rolle in unserer Umwelt als auch in der/unserer Gesellschaft.

Dikau und Glade definieren den Begriff folgendermaßen:

„Unter gravitativen Massenbewegungen versteht man bruchlose und bruchhafte hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fels und/oder Lockergesteinen unter Wirkung der Schwerkraft. Sie sind eine natürliche Prozessgruppe der Geosysteme“. (DIKAU ET GLADE 2002: 40)

Sie werden unterschieden nach:

- der Art des bewegten Materials
- der Art des Bewegungsvorganges und
- der Bewegungsgeschwindigkeit (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 469).

Aufgrund der Abweichung der Definition unterschiedlicher Disziplinen wurde im Jahr 1990 eine einheitliche Terminologie festgelegt. Die Ergebnisse dieser international akzeptierten und gut etablierten Definition wurden von Cruden, Varnes (1996) und Richard Dikau (1996) aufgegriffen. Dieses Grundkonzept blieb bis heute erhalten. (vgl. GLADE ET ZANGERL 2019: 369)

Die Definition von Cruden 1991 lautet folgendermaßen:

„A movement of a mass of rock, earth or debris down a slope“. (CRUDEN 1991: 27)

Im englischen Sprachgebrauch hat sich neben dem Begriff „mass movements“ auch der Begriff „landslides“ etabliert, um die gesamte Prozessgruppe zu charakterisieren (vgl. DIKAT ET GLADE 2001: 42).

Gravitative Massenbewegungen werden direkt und indirekt von Menschen beeinflusst und sind von klimarelevanten Faktoren abhängig. Sie treten sowohl an von Menschen unbeeinflussten Hängen, wie z.B. im hochalpinen Gebiet, an Hängen von eingeschnittenen Tälern und Schichtstufen in Mittelgebirgen, sowie an Böschungen, die vom Menschen geschaffen wurden, auf. Diese sind z.B. Gebiete, in denen Baugebiete ausgewiesen oder flächenhafte Flurbereinigungen durchgeführt wurden. (vgl. GLADE et al 2017: 115)

4.1.1 Klassifikation

Die Klassifikation von gravitativen Massenbewegungen bildet eine wichtige Voraussetzung, um die Prozesse und die Phänomene beschreiben und verstehen zu können. Die Klassifikationssysteme basieren auf unterschiedlichen Eigenschaften der Prozesse, wie Aktivitätsgrad, Untergrundmaterial, Prozessmechanismus, Geschwindigkeit, Wassergehalt und Geomorphometrie der bewegten Masse. Außerdem erfolgt sie auf Basis des dominanten Prozesstyps und des mobilisierten und transportierten Materials. Das Material kann Festgestein, grobes Lockergestein und feines Lockergestein umfassen: (DIKAU ET AL. 2019: 190)

- Das Festgestein tritt als kohärente und konsolidierte Masse auf, während sich das Lockergestein in den Korngrößenbereichen $<2\text{mm}$ und $>2\text{mm}$ befindet (vgl. ebd.: 200).
- Das Lockergestein wird in fünf Lockergesteinstypen unterteilt. Diese sind Ton, Schlamm, Schluff, Sand, Kies, Steine und Blöcke, Schutt und Torf. (vgl. GLADE ET ZANGERL 2019: 370)

Die Verlagerungsprozesse der gravitativen Massenbewegungen sind das Fallen, Kippen, Driften, Rutschen, Fließen, Gleiten und die kombinierte, komplexe Bewegung. (vgl. GLADE ET STÖTTER 2007: 151) Laut dem Endbericht der Extrema treten in Österreich alle Typen gravitativer Massenbewegungen auf. (vgl. GLADE ET ZANGERL 2019: 375)

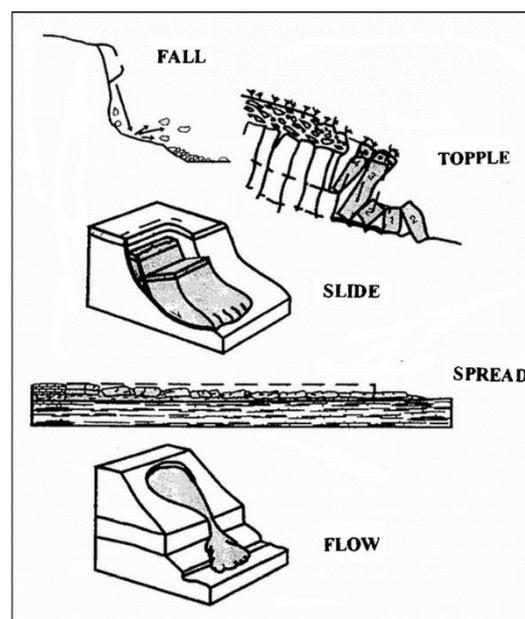


Abbildung 1: Unterschiedliche Typen gravitativer Massenbewegungen (Quelle: GLADE ET ZANGERL 2019: 375)

Die folgende Tabelle zeigt das Klassifikationssystem nach Varnes (1978) (Quelle: DIKAU ET GLADE 2002):

Tabelle 1: Klassifikationssystem nach Varnes (Quelle: DIKAU ET GLADE 2002)

Prozess	Material: Festgestein	Material: Lockergestein	Material: Boden
<i>Fallen</i>	Steinschlag, Felssturz	Fallen von Lockersubstrat	Fallen von Bodenmaterial
<i>Kippen</i>	Felskippen	Kippung im Lockersubstrat	Kippung von Bodenmaterial
<i>Gleiten/Rutschen (Rotationsbewegung)</i>	Rotationsrutschung	Rotationsrutschung	Rotationsrutschung
<i>Gleiten/Rutschen (Translationsbewegung)</i>	Fels-, Blockgleitung	Schuttrutschung, -strom	Blattanbruch, Grasnarbenrutschung
<i>Driften</i>	Bergzerreiung, Felsdrifting	Schuttdriften	Bodendriften
<i>Flieen</i>	Sackung (Felsflieen, Talzusub)	Mure, Murgang	Schlammstrom, feinkörnige Mure, Sandflieen
<i>Komplexe Massenbewegung</i>	Sturzstrom, Bergsturz, Bergzerreiung, Grohangdeformation	tiefgründige Hangdeformation	flachgrndiges Bodenkriechen

Fallen: Unter Fallen versteht man ein frei fallendes, springendes oder rollend abstrzendes Untergrundmaterial. Entlang den Flächen, an denen die Ablösung des Materials erfolgt, finden geringe oder keine Scherbewegungen statt. (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 190) Hierbei handelt es sich um die Materialkategorien des Fest- und Lockergesteins. Die Ablösung solcher kleineren Sturzmassen, die sich von steilen Wänden oder Hängen plötzlich ablösen, ist das Ergebnis unterschiedlicher Verwitterungsprozesse. Somit tritt ein Fallprozess dann auf, wenn die destabilisierten Kräfte die Materialstabilität berschreiten. (vgl. ebd.: 203f)

Kippen: Bei einem Kippprozess handelt es sich um eine Rotationsbewegung von Untergrundmaterial an steilen Flächen in Abhängigkeit des Trennflächengefüges um einen Punkt oder eine Achse unterhalb ihres Schwerpunktes (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 491). Ein Kippprozess kann sowohl als langsamer Gleitprozess, als auch als schneller Fallprozess bezeichnet werden. Das Kippen wird genauso wie bei einem Fallprozess in die Materialkategorien des Fest- und Lockergesteins gegliedert. Sie tritt an Säulen oder Pfeilern auf, die unterschiedlich stark vom Gesteinsverband getrennt wurden. Die Ablösung des Materials findet an einzelnen oder mehreren

Oberflächen und an existierenden Materialdiskontinuitäten statt. Des Weiteren kann eine Kippung in Lockergesteinen bereits bei geringeren Hanghöhen entstehen, wobei das Auftreten von Kippungen im Festgestein an höhere Hänge gebunden ist.

Anschließend geht das gelöste Material von einem Kippprozess in einen Fallprozess über. Die auslösenden Faktoren eines Kippprozesses sind u.a. Verwitterung, sowie Auspressung und plastische Deformation des liegenden Materials. (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 205f)

Gleiten/Rutschen: Ein Gleit- oder Rutschvorgang vollzieht sich bei einem Untergrundmaterial einer hangabwärts gerichteter Bewegung von Boden- oder Felsmassen auf Gleitflächen oder auf verhältnismäßig dünnen Zonen intensiver Scherverformung (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 491). Die bewegende Masse auf der Gleitfläche kann unverformt bleiben und sich während des Bewegungsvorgangs in einen Fließprozess transformieren. Man unterscheidet zwischen Translations- und Rotationsrutschungen. (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 207)

Driften: Unter Driften versteht man die Bewegung von Felsmassen mit einem Einsinken in die weniger kompetenten und liegenden Schichten ohne intensive Sicherung auf Gleitflächen. Dem Driftprozess gehen meistens Kippbewegungen voraus. Wenn sich Gesteinsblöcke an Trennflächen ablösen, driften sie auf der tonigen Unterlage. (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 493) Ihre Bewegungsraten variieren zudem von wenigen mm pro Jahr bis zu mehreren m pro Sekunde (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 216).

Fließen: Ein Fließprozess ist eine irreversible, sich fortsetzende Deformation von Untergrundmaterial. Hierbei gleicht sich die Geschwindigkeitsverteilung der bewegten Masse einer viskosen Flüssigkeit. (vgl. ebd.: 190) Gravitative Fließprozesse können Locker- und Festgestein in hoher Magnitude transportieren und werden daher als sehr effektiv bezeichnet (vgl. ebd.: 211). Bei einem Fließprozess wird zwischen Erd- bzw. Schlammfließen, die mindestens 50% Sand-, Schluff- und Tonmaterial enthalten, und Schutt- bzw. Geröllstromrutschungen, die einen hohen Prozentanteil großkörnigen Materials enthalten, unterschieden (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 495).

Komplexe Massenbewegung: Viele Rutschungen weisen nicht nur einen einzigen Bewegungsprozess auf, sondern bestehen meistens aus mehreren Rutschungstypen (vgl. ebd.: 497). Unter komplexen Massenbewegungen versteht man gravitative Prozesse, die in Kombination oder zeitlich sequenziell auftreten. Der Begriff

„komplex“ ist sozusagen die Mischung von zwei oder mehreren Komponenten und wird im englischsprachigen Raum als „complex landslide“ bzw. „complex mass movements“ bezeichnet (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 219). Während der Hangabwärtsbewegung stellt der initiale Prozess eine Translationsrutschung in Form einer Felsgleitung dar, die in andere Prozesse wie Fließprozesse transformiert. (vgl. ebd.: 190)

Oft setzen sich gravitative Massenbewegungen aus verschiedenen Bewegungsmechanismen zusammen und können daher nicht eindeutig einem Typen zugeordnet werden. Murgänge haben eine Sonderstellung in diesen Klassifikationen, da sie aus einem Lockergesteins und Wassergemisch bestehen. Diese bewegen sich fließend hangabwärts und folgen hydraulischen Fließgesetzen. (vgl. DIKAU ET GLADE 2001: 42)

4.2 Naturgefahren

Die dynamische Bevölkerungsentwicklung in vielen Regionen, die zunehmende Bedeutung an Infrastrukturkorridoren und Verkehrsanbindungen, die Ausdehnung der Siedlungsräume in teilweise naturgefahrrensensible Bereiche und die Auswirkungen des Klimawandels führen zu einer zunehmenden Bedeutung an Naturgefahren (vgl. ÖROK 2016: 7). Laut Elverfeldt et al. werden Vulkanausbrüche, Schneelawinen, Erdbeben, Muren oder Steinschläge als Naturereignisse angesehen, wenn diese keine Bedrohung für die Menschen, Gesellschaft und Eigentum darstellen (vgl. ELVERFELDT ET AL. 2007: 31). Das heißt, dass bei dem Begriff Naturereignis jegliche Betrachtungen von Konsequenzen nicht berücksichtigt werden (vgl. GLADE ET PÖPPL 2013: 5). Stellen sie eine Bedrohung dar, so werden diese als Naturgefahren gekennzeichnet (vgl. ELVERFELDT ET AL. 2007: 31).

Naturgefahren können zu einer Bedrohung von Menschen und deren Lebensräumen, sowie von Vermögenswerten und der Umwelt führen. Ein Risiko liegt dann vor, wenn die Naturgefahr und die damit verbundenen Ereignisse einen Schaden hervorrufen. (vgl. RUDOLF MIKLAU 2009: 3)

Naturgefahren werden gemäß Varnes (1984) wie folgt definiert:

„Unter einer Naturgefahr wird im Folgenden die Auftretenswahrscheinlichkeit eines potentiell schadensbringenden Ereignisses in einer bestimmten Zeit und in einem definierten Raum verstanden“. (DIKAU ET GLADE 2001: 42)

Naturereignisse werden laut Rudolf-Miklau folgendermaßen definiert:

„Unter einem Naturereignis versteht man jeden natürlich abgrenzbaren Vorgang unabhängig von dessen Auswirkungen auf den Lebensraum des Menschen“. (RUDOLF-MIKLAU 2009: 2)

Alpine Naturgefahren sind durch hohe Prozessenergie sowie kurze Vorwarnzeiten charakterisiert. Zudem treten sie mit unterschiedlicher Frequenz und Intensität auf. Lediglich unterteilt man den Großteil der Naturgefahren im alpinen Raum Österreichs in meteorologische, hydrologische und gravitative Naturgefahren:

- Meteorologische Naturgefahren: Kälteeinbrüche, Stürme, Eis- und Schneelasten, Hagel und Hitzewellen sorgen für das Auftreten von Hochwasser, Sturzfluten, intensive Bodenerosion, Hitze, Dürre und Waldbrände.
- Hydrologische Naturgefahren: Sturzfluten, Hochwasser und fluviale Feststoffkatastrophen zählen zu den hydrologischen Naturgefahren.
- Gravitative Naturgefahren: Gravitative Naturgefahren sind jene Prozesse, die zu einer Gefährdung durch hangabwärts gerichtete Verlagerung von Material kommt. Beispielsweise Felsbewegungen, Rutschungen, Hangmuren, Stein- und Blockschläge. (vgl. SATTLER ET MEHLHORN 2019: 48ff)

4.3 Naturrisiken

Ein Naturrisiko liegt dann vor, wenn die Konsequenzen von Naturgefahren betrachtet werden. Laut Glade und Pöpl setzen sich die Konsequenzen aus Risikoelementen wie Menschen, Häuser, Infrastrukturen und aus der Vulnerabilität gegenüber einer bestimmten Intensität im Sinne deren Stärke zusammen. In neueren Untersuchungen werden sowohl Anpassung als auch Bewältigungsfähigkeit miteinbezogen. (vgl. GLADE ET PÖPPL 2013: 5)

4.4 Naturkatastrophen

Kommt es durch das Eintreten eines Naturereignisses zu einer Störung einer Gesellschaft oder Gemeinschaft durch schwerwiegende Verluste, so spricht man von einer Naturkatastrophe (vgl. SATTLER ET MEHLHORN 2019: 48).

Laut UNDRO 1991 werden Naturkatastrophen folgendermaßen definiert:

„Eine Naturkatastrophe bezeichnet einen tatsächlich eintretenden natürlichen Prozess bzw. eine realisierte Gefahr, bei der derartig hohe Verluste an Menschenleben oder materiellen Werten entstehen, dass die betroffene Gesellschaft akute Nothilfe und Hilfe beim Wiederaufbau benötigt“.

(ELVERFELDT ET AL. 2007: 31)

Naturkatastrophen verursachen schwere Schäden, Verluste, und viele Todesopfer, da sie eine Bedrohung für die Bevölkerung darstellen.

Um eine Klassifikation und Einordnung der Ereignisse gewährleisten zu können, wurden folgende Kriterien eingeführt:

- Anzahl der Todesopfer
- Anzahl der Verletzten
- Anzahl der Obdachlosen
- Anzahl der zerstörten und beschädigten Häuser
- Ausmaß an volkswirtschaftlichen Schäden
- Kosten der Rettungs- und Suchaktionen. (vgl. DIKAU ET GLADE 2001: 43)

4.5 Extremereignisse

Der Begriff „Extremereignis“ wird mit dem Begriff „Katastrophe“ in Verbindung gesetzt, da in Folge eines Extremereignisses enorme Schäden und katastrophale Auswirkungen auf Personen, Infrastruktur, Umwelt und Sachschäden entstehen können .die mit besonders extremen (hoch oder niedrig) Intensitäten einhergehen. (vgl. ZAMG 2021: o.S.) Es handelt sich um jene Ereignisse, die dem Durchschnittswert abweichen und eine seltene bzw. unregelmäßige Wiederkehrwahrscheinlichkeit aufweisen. Eine einheitliche Terminologie von Extremereignissen gibt es nicht, da diese stark nach einzelnen

Naturgefahrenprozessen variieren. Sie werden häufig nach deren Konsequenzen charakterisiert. (vgl. GLADE 2019: 59) Aufgrund des eher seltenen Auftretens und der Komplexität der Prozesse sind Extremereignisse schwer zu untersuchen und noch schwieriger vorherzusagen. Aus diesem Grund konzentriert man sich bei der Analyse von Extremereignissen hauptsächlich auf die Untersuchung ihrer Häufigkeitsverteilung. (vgl. CHAVEZ ET AL. 2015: 9) Schlussendlich werden das Wiederkehrintervall solcher Prozesse und deren Stärke in bestimmten Regionen untersucht, um entsprechende Muster abzuleiten um mögliche Szenarien zu entwickeln (GLADE 2019: 60).

Lediglich unterscheidet man zwischen folgenden Extremereignissen:

- *Meteorologische Extremereignisse* wie Extremtemperaturen, Trockenheit, Schnee- und Eislast, Stürme, Starkniederschlag, Hagel und Waldbrände.
- *Hydrologische Extremereignisse* wie Niederwasserprozesse, Hochwasser, Sturzfluten, fluviale Feststoffereignisse, Überlastfälle und Bodenerosion.
- *Gravitative Extremereignisse* wie Felsgleitung, Felslawine, Erd-/Schuttstrom, Steinschlag, Felssturz, Hangrutschungen und Muren.
- *Glaziale und periglaziale Extremereignisse* wie Permafrostgefahren und Gletschergefahren.
- *Weitere Extremereignisse* wie Erdbeben, Multi-Hazards und Kaskadeneffekte. (vgl. EXTREMA 2019: o.S.)

Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit den gravitativen Extremereignissen, die im Alpenraum vorkommen.

4.6 Klimawandel

Der Begriff „Klima“ wird nach dem Weltklimarat IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) folgendermaßen definiert:

„Klima im engeren Sinne ist normalerweise definiert als das durchschnittliche Wetter, oder genauer als die statistische Beschreibung in Form von Durchschnitt und Variabilität relevanter Größen über eine Zeitspanne im Bereich von Monaten bis zu Tausenden oder Millionen von Jahren.“ (IPCC 2007: 28)

Der Begriff „Klimawandel“ wird nach dem APCC (Austrian Panel on Climate Change) wie folgt definiert:

“Der Klimawandel eine Veränderung des Klimas auf der Erde über einen längeren Zeitraum”. (APCC 2018: 323)

Messungen meteorologischer Parameter haben bereits Mitte des 19. Jahrhunderts nachgewiesen, dass sich das globale Klima der Erde seit Beginn der Industrialisierung dramatisch verändert hat. Der stärkste Temperaturanstieg erfolgte in den letzten 30 Jahren. (vgl. SEILER 2006: 7) Der Anstieg der mittleren Oberflächentemperatur für Österreich ungefähr 1,8°C. Die Hauptursache des starken Temperaturanstiegs ist die Verstärkung des natürlichen Treibhauseffekts, die durch die ausgestoßenen Treibhausgase und durch die Folgen der Verbrennung fossiler Energieträger zu einer Erwärmung der Erdatmosphäre führt. Zusätzlich spielt der Verlust an Waldflächen, insbesondere die Abholzung tropischer Regenwälder eine erhebliche Rolle. (vgl. PATEK 2007: 1) Im Zuge dessen wird das ökologische System beeinträchtigt und die natürliche Anpassung ist nicht mehr möglich (vgl. HEIL 2009: 15). Laut Fleischhacker ist es unmöglich, klimatische Veränderungen in den nächsten Dekaden zu verhindern (vgl. FLEISCHHACKER 2018: 259). Die Zukunftsprognosen des Klimawandels sind nach Erkenntnissen des IPCC wie zu erwarten. Die Treibhausgase werden in den nächsten 100 Jahren steigen und einen Temperaturanstieg von bis zu 5,8°C verursachen. Falls keine Gegenmaßnahmen gesetzt werden, wird von einer schnelleren Erwärmung der Erde ausgegangen. (vgl. PATEK 2007: 1)

4.7 Risikomanagement

Der Schutz von Naturgefahren in Österreich hat eine lange Tradition. Die zunehmenden Schadensereignisse gravitativer Naturgefahren rücken immer stärker in den Fokus und somit wird der dringende Bedarf nach einem integrierten Risikomanagement offensichtlich. (vgl. ÖROK 2016: 7)

Der Begriff „Risikomanagement“ wird wie folgt definiert:

„Das Risikomanagement ist jede Form des Umgangs mit Naturgefahren und Naturrisiken“. (GLADE ET PÖPPL 2013: 5)

Das Ziel eines integrierten Risikomanagements ist das Zusammenagieren aller Akteure, um planerische, forstlich-biologische, organisatorische und bautechnische Maßnahmen zu erreichen. Um eine möglichst große Sicherheit vor gravitativen Naturgefahren zu gewährleisten, entwickelt ein integriertes Risikomanagement sektorübergreifende Schutzkonzepte, die unter Berücksichtigung bislang getroffener Aktivitäten unterschiedliche abgestimmte Lösungen für einzelne Planungsregionen anbieten. Dabei soll der Fokus auf die Wirksamkeit von Schutzmechanismen und die zunehmenden Anforderungen an die Gefahrenbeurteilung gerichtet werden. Ein integriertes Risikomanagement soll demnach eine Reduktion möglicher Schäden durch Naturgefahren erreichen und durch die frühzeitige Berücksichtigung von Naturgefahren im Planungsprozess das Entstehen von enormen Risiken verhindern. Grundsätzlich sollen Gebiete mit hohem Gefahrenpotenzial nicht bebaut werden und bestehende Bauwerke eine Erhöhung der Sicherheit anstreben. (vgl. ÖROK 2016: 14)

5. Gravitative Massenbewegungen

Dieses Kapitel der Arbeit soll einer allgemeinen Beschreibung gravitativer Massenbewegungen dienen. Daher werden zu Beginn der Aktivitätsstatus, Geschwindigkeits- und Schadensausmaß gravitativer Massenbewegungen repräsentiert. Der Fokus richtet sich hierbei nicht nur auf die unterschiedlichsten Faktoren, sondern auch auf die Beschreibung der Prozesse, die für das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen verantwortlich/relevant sind. Die Rolle der Menschheit sowie deren Beeinflussung auf die gravitativen Massenbewegungen sollen vorgestellt und anschließend repräsentiert werden.

5.1 Aktivitätsstatus

Der Aktivitätsstatus der gravitativen Massenbewegungen spielt bei der Betrachtung ihres momentanen Zustandes eine zentrale Rolle. Cruden und Varnes (1996) unterscheiden acht Aktivitätszustände bei der Beschreibung des Aktivitätsstatus von gravitativen Massenbewegungen:

Tabelle 2: Aktivitätsstatus gravitativer Massenbewegungen (Quelle: CRUDEN ET VARNES 1996)

Klasse	Aktivitätsstatus	Beschreibung
1	Aktiv	Massenbewegung, die gegenwärtig in Bewegung ist
2	Reaktiv	Massenbewegung, die nach einer inaktiven Phase gegenwärtig wieder aktiv ist
3	Inaktiv	Massenbewegung, die sich innerhalb der letzten 12 Monate nicht bewegt hat
4	Blockiert	Massenbewegung, die sich im letzten jährlichen Zyklus bewegt hat, aber im Moment inaktiv ist
5	Latent	Inaktive Massenbewegung, die durch geänderte Einflussfaktoren wieder reaktiviert werden kann
6	Abgeschlossen	Inaktive Massenbewegung, die nicht mehr von ihren ursprünglichen Faktoren beeinflusst wird
7	Stabilisiert	Inaktive Massenbewegung, deren Bewegung durch Sanierungsmaßnahmen reduziert bzw. beendet wurde
8	Relikt, fossil	Inaktive Massenbewegung, die unter anderen geomorphologischen bzw. klimatischen Bedingungen entstanden ist und aktuell die Landschaft prägt

Die angeführten Klassen werden in drei Hauptklassen gegliedert:

1.) Aktiv: Die Klassen 1 und 2 gehören zur Hauptklasse „aktiv“. Unter „aktiv“ versteht man die aktuelle Bewegung des entsprechenden Objekts, ganz gleich ob es sich um mehrere m pro Sekunde oder wenige cm im Jahr handelt.

2.) Momentan inaktiv: Die Klassen 3, 4 und 5 gehören zur Hauptklasse „momentan inaktiv“. Unter „momentan inaktiv“ versteht man jene gravitativen Massenbewegungen, die momentan nicht in Bewegung sind. Dazu gehören jene Massenbewegungen, bei denen eine Bewegung innerhalb der letzten 12 Monate nicht beobachtet werden konnte, jene, die sich im letzten jährlichen Zyklus zwar bewegt hatten, jedoch aktuell keine Bewegungen mehr zeigen und jene Massenbewegungen, die im Moment inaktiv sind, jedoch durch geänderte Einflussfaktoren wieder reaktiviert werden können.

3.) Dauerhaft inaktiv: Die Klassen 6, 7 und 8 gehören zur Hauptklasse „dauerhaft inaktiv“. Dazu zählen jene Massenbewegungen, die nicht mehr durch die ursprünglichen Faktoren reaktiviert werden können, jene, die durch Sanierungsmaßnahmen stabilisiert wurden und jene, die unter anderen geomorphologischen bzw. klimatischen Bedingungen entstanden sind. Der Zustand der dauerhaft inaktiven Massenbewegungen ist abgeschlossen und es gibt keine

Anzeichen, dass diese wieder angeregt werden. (vgl. GLADE ET ZANGERL 2019: 375)

5.2 Geschwindigkeit und Schadensausmaß

Die Geschwindigkeit aktiver gravitativer Massenbewegungen ist sehr unterschiedlich und weist eine äußerst große Spannbreite der zugrunde liegenden Prozesse und deren Geschwindigkeiten auf. Laut Dikau et al. können Massenbewegungen als schnell ablaufender (Bergstürze, Murgänge und Steinschläge) oder als langsam ablaufender Prozess (Felsfließen oder Schuttstrom) vorkommen. (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 202) Varnes erfasste erstmals die unterschiedlichen Geschwindigkeitsklassen und Zangerl et al. ordnete den unterschiedlichen Bewegungsklassen eine Geschwindigkeit für die verschiedenen Arten der Bewegung und fügte zusätzlich eine Beschreibung jeder Klasse hinzu (vgl. GLADE ET ZANGERL 2019: 376). Bell et al. teilte die Geschwindigkeitsklassen ein und verglich diese mit dem Schadensausmaß. Die folgende Tabelle soll die Geschwindigkeitsklassen und den Schadensausmaß gravitativer Massenbewegungen veranschaulichen:

Tabelle 3: Geschwindigkeitsklassen und Schadensausmaß gravitativer Massenbewegungen (Quelle: BELL ET AL. 2010)

Geschwindigkeitsklasse	Beschreibung	Geschwindigkeit (mm/s)	Mögliches Schadensausmaß
7	Extrem schnell		<ul style="list-style-type: none"> - Zerstörung von Bauwerken - Viele Tote - Unwahrscheinliche Fluchtmöglichkeit - Katastrophencharakter
		5 x 10 ³ mm/s 5m/s	
6	Sehr schnell		<ul style="list-style-type: none"> - Einige Tote - Aufgrund großer Geschwindigkeit ist es nicht möglich, allen Menschen die Flucht zu ermöglichen
		5 x 10 ⁻¹ mm/s 3m/min	
5	schnell		<ul style="list-style-type: none"> - Die Struktur der Gebäude sind zerstört - Eine Flucht und Evakuierung ist möglich
		5 x 10 ⁻¹ mm/s 1,8m/h	

4	Mäßig schnell		- Befristete Erhaltung von unempfindlichen Bauwerken
		5×10^{-3} 158 m/a	
3	Langsam		- Erhaltung von unempfindlichen Strukturen mit Sanierungsarbeiten, falls die Gesamtbewegung während einer Beschleunigungsphase nicht zu groß ist - Durchführung von Sicherheitsmaßnahmen sind während der Bewegung durchführbar
		5×10^{-5} 1,6m/a	
2	Sehr langsam		- Einige Bauwerke können den Bewegungen widerstehen
		5×10^{-7} 16mm/a	
1	Extrem langsam		- Baumaßnahmen nur mit Auflagen möglich - Bewegungen sind ohne Messgerät nicht wahrnehmbar

Bell et al. ordnet die Klassen 6 und 7 in eine Kategorie, die einige Tote und Beschädigungen von Gebäuden oder der Infrastruktur zu Folge hat. Die Klassen 1 und 2 hingegen werden nur mit Messgeräten sichtbar, da es sich um sehr langsame Bewegungen handelt. (vgl. BELL ET AL. 2010: 13)

5.3 Ursachen

Das folgende Unterkapitel beschreibt die Ursachen von gravitativen Massenbewegungen und richtet sich dabei auf unterschiedliche Faktoren und Beschreibungen der Prozesse, die für das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen verantwortlich sind. In Anlehnung an Crozier unterscheidet man bei der Untersuchung und Analyse der Ursachen zur Auslösung gravitativer Massenbewegungen drei Faktoren:

- **Dispositive Faktoren** (vorbereitende Faktoren): Charakterisieren den Hang in Bezug auf seine fels- oder bodenmechanischen, hydrologischen und seine weiteren, für die gravitativen Prozesse relevanten Eigenschaften. Diese Faktoren destabilisieren zwar den Hang, lösen aber keinen Prozess aus. (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 202)
- **Prozessauslösende Faktoren**: Regen die Massenbewegung durch das Überschreiten des Gleichgewichts bzw. des fels- und bodenmechanischen

Schwellenwertes an. In Folge dessen wird der Hang in den aktiv instabilen Zustand geführt. (vgl. ebd.: 202) Sie umfassen hydrometeorologischen Gegebenheiten wie Starkregen, Schneeschmelze, aber auch Impulse durch Erdbeben und menschliche Einflüsse wie Sprengungen (vgl. GLADE ET ZANGERL 2019: 379).

- **Kontrollierende Faktoren:** Steuern die aktuellen Bewegungsvorgänge und sind für den Bewegungspfad, die Geschwindigkeit, Reichweite und das Volumen der bewegten Masse verantwortlich, wie zum Beispiel Hangneigung und Hangkrümmung oder die Hangstruktur (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 202).

5.3.1 Destabilisierende Faktoren

Neben den beschriebenen Faktoren, die in vorbereitende, auslösende und kontrollierende Faktoren unterteilt sind, gibt es weitere destabilisierende Faktoren, die zu einer Instabilität eines Hanges führen. Eine Hanginstabilität kann demnach die Ursache für die Auslösung einer gravitativen Massenbewegung sein. Parameter, die eine Hanginstabilität fördern, sind u.a. Vegetationsänderungen, Verwitterungserscheinungen oder Änderung der Hanggeometrie. (vgl. POPESCU 1994: 71) Die Stabilität der Hänge kann aber auch durch Verkarstungs- und Versturzmassen erheblich geschwächt sein (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 471). Kräfte, die von außen einwirken und eine zusätzliche Hanginstabilität begünstigen, werden laut Popescu in endogene und exogene Faktoren sowie in anthropogene Einflüsse eingeteilt (vgl. POPESCU 1994: 71).

5.3.2 Exogene Faktoren

Unter exogenen Faktoren versteht man jene Kräfte, die von außen auf die Erdoberfläche einwirken und diese kontrollieren, wie z.B. Niederschläge und Verwitterungsprozesse (vgl. POPESCU 1994: 71). Weitere exogene Faktoren können u.a. ein klimatisch bedingter Aufbau oder Rückzug der Vegetation, Trockenheit oder temporäre fluviale Erosion, sowie menschliche Eingriffe sein (vgl. LOTTER ET HABERLER 2013: 13). Nachfolgend sollen physikalische Ursachen exogener Faktoren wie Starkniederschläge, Permafrost, Schnee- und Eisschmelze sowie die anthropogenen Ursachen beschrieben werden.

5.3.2.1 Physikalische Ursachen

Das folgende Unterkapitel beschreibt die wichtigsten physikalischen Hauptauslöseursachen wie Niederschlag, Permafrost, Eis- und Schneeschmelze sowie anthropogene Ursachen im Detail. Die Auswirkungen all dieser Ursachen sind sehr unterschiedlich und hängen von Faktoren wie Steilheit des Hanges, der Bodenart, der Morphologie oder Form des Geländes, der Geologie und davon, ob sich Menschen oder Bauwerke in den betroffenen Gebieten befinden, ab. (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 30)

5.3.2.2 Starkniederschläge

Starkniederschläge, extrem anhaltende Niederschläge sowie Feuchtperioden und der daraus resultierender hydrologischer Druck sind eines der Hauptursachen für die Auslösung von Felsstürzen, Murenabgängen und Hangrutschungen. Niederschläge können Porenwassersättigung und überdruck in Lockergesteinen oder Kluftwasserschub in Festgesteinen zu Folge haben. (vgl. LOTTER ET HABERLER 2013: 13) Zudem können sie das ganze Jahr über auftreten und weisen ein großes Risiko entlang der Alpenränder auf. Sie werden stark durch den Klimawandel begünstigt, das zu instabileren Luftschichtungen führt. Außerdem spielen Dauer, Einwirkung und Intensität eines ergiebigen Niederschlags eine wichtige Rolle bei der Entfaltung seiner Schadenswirkung. (vgl. PISTOTNIK ET AL. 2019: 144) Kurze Niederschläge vs. länger anhaltendem Landregen, aber auch die Vorfeuchte im Lockermaterial, Schneemenge und Schneeschmelze zählen zu den wichtigsten Faktoren (vgl. LOTTER ET HABERLER 2013: 13). Aufgrund der langanhaltenden Niederschläge erhöht sich der Grundwasserspiegel und dadurch entsteht ein starker Porenwasserdruck (vgl. KENNER ET PHILLIPS 2017: 22f). Ein Porenwasserdruck kommt dann vor, wenn die Poren in einem Untergrund mit Wasser gefüllt sind und dadurch das Porenwasser nicht schnell genug abfließen kann (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 46).

5.3.2.3 Permafrost

Permafrost ist einer der wichtigsten Einflussfaktoren und Ursachen für die Auslösung eines Felssturzes. Unter Permafrost versteht man ein Boden-, Locker- oder Felsmaterial, bei dem man davon ausgeht, dass die Temperatur mindestens in den

letzten zwei Jahren unter 0°C betrug (vgl. OTTO ET AL. 2019: 537) Für das Auftreten von Permafrost spielen die Bedingungen wie Hangneigung, Hangausrichtung, Seehöhe, Vegetation und Beschaffenheit des Untergrunds eine wichtige Rolle. Außerdem ist er wichtig für die Stabilisierung von alpinen Felswänden, insbesondere in hohen Steillagen (vgl. ZAMG o.J.: o.S.) Die Klimaerwärmung spielt bei der Lockerung von Felsformationen eine erhebliche Rolle, da sie nach einiger Zeit instabiler werden und abstürzen (vgl. GLADE ET AL. 2017: 116).

5.3.2.4 Schnee- und Eisschmelze

Durch Starkniederschläge und das Ansammeln von Wasser kommt es zu einer Erhöhung des Porenwasserdrucks im Erdboden und des Grundwasserspiegels. Dies hängt oft mit dem Abschmelzen von Eis und Schnee zusammen. Durch das gesammelte Wasser wird der Schwerwiderstand im Wasser reduziert und das Eis erwärmt. Das erwärmte Eis bzw. der Schnee verursachen in Kombination mit dem hydrologischen Druck einen Reibungsverlust, der wiederum die Entstehung eines Felssturzes, eines Murganges oder einer Hangrutschung begünstigt. (vgl. KENNER ET PHILLIPS 2017: 22f)

5.3.2.5 Anthropogene Einflüsse

Unter anthropogenen Einflüssen versteht man jene Einflüsse, die bewusste anthropogene Veränderungen vornehmen (vgl. POPESCU 1994: 71). Wichtige Faktoren in diesem Kontext sind u.a. der Bevölkerungszuwachs, die Konzentration von Bevölkerung und Werten in dicht besiedelten Gebieten, die Besiedlung und Industrialisierung stark exponierter Regionen, die Anfälligkeit moderner Gesellschaften und Technologien, die Armut der exponiertesten Bevölkerungsgruppen und menschliche Eingriffe in natürliche Geosysteme (GLADE ET DIKAU 2001: 49). Wichtige Beispiele des menschlichen Eingriffs auf Hangsysteme sind u.a. Hangunterschneidungen, hydrologische Eingriffe wie Wassereinleitung oder Verhinderung des Wasseraustritts durch Verbauung und Veränderungen der Hanggeometrie bzw. durch versiegelte Gebäude- und Siedlungsflächen, sowie Wege- und Straßennetze (vgl. GLADE 2006: 29). Des Weiteren können anthropogene Veränderungen wie Landnutzungsänderungen, Bewirtschaftung,

Hangdrainagen, Anschüttung und Ausgrabung von Material den ursprünglich natürlichen Zustand des Hangsystems hervorrufen (vgl. GLADE ET AL. 2019: 464). Bemerkenswert ist aber auch die Übersteigung von Hängen durch Unterhöhlung des Bodens und die Belastung des oberen Teils eines Hanges, sodass die natürliche Tragfähigkeit des Bodens überschritten wird (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 33). Diese Eingriffe des Menschen werden an einem aufgrund natürlicher Faktoren instabilen oder im Grenzgleichgewicht befindlichen Hang vorgenommen, die zusätzliche destabilisierende Wirkung zu Folge haben (vgl. LOTTER ET HABERLER 2013: 13).

5.3.3 Endogene Faktoren

Unter endogenen Faktoren versteht man jene Kräfte, die von innen wirken. Sie werden in geologische Verhältnisse und in morphologische Ursachen eingeteilt (vgl. POPESCU 1994: 71). Nachfolgend werden morphologische Ursachen und geologische Verhältnisse endogener Faktoren wie Erdbeben und Vulkanausbrüche beschrieben.

5.3.3.1 Morphologische Ursachen

Unter morphologischen Ursachen versteht man Veränderungen wie die Talvertiefung und Übersteilung der Hänge durch Erosion, Belastung eines Hanges, Entlastung eines Hangfußes sowie Hangneigung, -form, -höhe und –ausrichtung. Darunter mildern Abgrabungen, das Abholzen eines Hanges oder Baumaßnahmen die Stabilität eines Hanges und begünstigen die Veränderung des Hanggleichgewichts und somit das Auftreten gravitativer Massenbewegungen, vor allem in Kombination mit anderen Faktoren, wie Erosion und Starkniederschlag. (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 471ff)

5.3.3.2 Geologische Verhältnisse

Für das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen unter geologischen Verhältnissen spielen vor allem die Gesteinsfestigkeit, die Struktur und Eigenschaft des Gesteins eine entscheidende Rolle. Hat das Gestein schwache Oberflächen

oder weist es abwechselnde Schichtungen vor, so ist es besonders anfällig für Rutschungen. (vgl. SIDLE 2006: 41)

5.3.3.3 Vulkanausbrüche und Erdbeben

Erdbeben zählen zu den physikalischen und geologischen Ursachen und sind Triggerfaktoren, die oftmals für die Auslösung von gravitativen Prozessen bzw. für die Anfälligkeit des Eintretens verantwortlich sind (vgl. GLADE ET ZANGERL 2019: 379f). Dabei spielen die Bodenerschütterungen, die Verflüssigung anfälliger Sedimente oder erschütterungsbedingter Dilatation von Bodenmaterialien, die eine schnelle Infiltration von Wasser ermöglichen, eine wichtige Rolle (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 32).

Vulkanische Aktivitäten erhöhen ebenso das Risiko der Wahrscheinlichkeit des Auftretens gravitativer Massenbewegungen. Die ausgeschüttete Lava bringt das Eis schnell zum Schmelzen und bildet eine Flut von Gestein, Asche, Wasser und Erde. Diese Flut kann sich somit an den steilen Hängen von Vulkanen schnell beschleunigen und alles in ihrem Weg verwüsten. Aufgrund dessen, dass sie ziemlich große Entfernungen erreichen kann, können Strukturen in flachen Gebieten rund um die Vulkane beschädigt werden. Somit werden durch schwache bzw. beschädigte Strukturen unterschiedliche Massenbewegungen wie Felsstürze, Rutschungen und Lawinen verursacht. (vgl. ebd.: 33)

5.4 Auswirkungen

Naturgefahren bzw. Extremereignisse sind mit möglichen negativen, starken oder nicht vorhersehbaren Auswirkungen für die Menschen bzw. Gesellschaft und die Umwelt zu betrachten. Deshalb bietet das folgende Unterkapitel einen kurzen Überblick über die Auswirkungen und Folgen gravitativer Massenbewegungen.

Gravitative Massenbewegungen können folgende Auswirkungen aufweisen:

- Verletzte, Todesopfer
- Sachschäden, Gebäudeschäden
- Beeinträchtigung von kritischer Infrastruktur oder des Verkehrs,
- direkte oder indirekte gesellschaftliche oder wirtschaftliche Konsequenzen.

(vgl. PREH ET AL. 2019: 437)

Laut Highland und Bobrowsky (2008) kann man zwischen Auswirkungen in bebauten Umgebungen (Wohnanlagen) und natürlichen Umgebungen (Wälder, Landschaften, Tiere) unterscheiden (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 34).

5.4.1 Auswirkungen auf den Menschen

Die Weltbevölkerung steigt und die natürliche Tragfähigkeit der Erde ist längst überschritten. Aufgrund dieser Zunahme neigen die Menschen dazu, in neue Gebiete einzuziehen, die früher als gefährlich eingestuft worden sind. (vgl. ebd.: 34)

Glade und Stötter (2001) strukturieren die Auswirkungen von gravitativen Massenbewegungen in direkte und indirekte Bereiche.

- Direkte Auswirkungen: umfassen jene Auswirkungen, die sich auf die bewegte Masse auswirken, darunter Verletzte, Tote, zerstörte Häuser und Infrastrukturen oder verlorene Landnutzungsflächen.
- Indirekte Auswirkungen: fordern eine Unterscheidung zwischen den direkten Folgewirkungen und den regionalen Effekten zum Zeitpunkt des Ereignisses. (vgl. GLADE ET DIKAU 2001: 43) Die indirekten Auswirkungen können aber auch so schwerwiegend sein, dass Touristen ihren Urlaub nicht mehr in dem jeweiligen Ort verbringen möchten (vgl. GLADE ET STÖTTER 2008: 158).

Während regionale Effekte aus lokal unterbrochenen Infrastrukturen resultieren, beinhalten Folgewirkungen unterschiedliche Maßnahmen wie Behandlung traumatisierter Menschen oder notwendige wirtschaftliche Änderungen der betroffenen Region. Dikau und Glade nennen ein Beispiel für eine regionale Folgewirkung:

„Wird ein Tal aufgrund eines Bergsturzes blockiert, so bildet es einen Bergsturzsee. Falls sich dieser Bergsturzsee aufgrund eines Durchbruchs schnell entleeren würde, würde dadurch eine Überflutung und massive Schäden hervorgerufen werden“. (vgl. GLADE ET DIKAU 2001: 43)

5.4.2 Sach- und Gebäudeschäden

Sach- und Gebäudeschäden kommen vor allem in der Umgebung von instabilen Hängen vor. Hierbei kann es sein, dass einzelne Häuser, größere Wohnhäuser, Mauern aber auch Wasser- und Stromleitungen, sowie gemeinschaftlich genutzte

Straßen beschädigt werden. Gravitative Massenbewegungen, die sich ohne Vorwarnung sehr schnell bewegen, beweisen sich oft als zerstörerisch. Ein Wiederbau in dem betroffenen Gebiet ist meistens ausgeschlossen, da Bewegprozesse auch nach Tagen, Wochen oder Monaten erneut auftreten können. (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 34)

5.4.3 Kritische Infrastrukturen

Das österreichische Programm zum Schutz kritischer Infrastrukturen (APCIP) wird folgendermaßen definiert:

„Kritische Infrastrukturen sind jene Infrastrukturen (Systeme, Anlagen, Prozesse, Netzwerke oder Teile davon), die eine wesentliche Bedeutung für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen haben und deren Störung oder Zerstörung schwerwiegende Auswirkungen auf die Gesundheit, Sicherheit oder das wirtschaftliche und soziale Wohl große Teile der Bevölkerung oder das effektive Funktionieren von staatlichen Einrichtungen haben würde“. (vgl. HAGER 2019: 671)

Kritische Infrastrukturen sind in diesem Sinne das soziale und institutionelle Subsystem - das sind österreichweit ca. 400 Unternehmen. Folgende Bereiche gelten als kritische Infrastrukturen:

- Öffentliche Sicherheit (Polizei, Zollaufsicht, Justizwache)
- Landesverteidigung
- Schutz der Zivilbevölkerung gegen Krisengefahren
- Funktionsfähigkeit öffentlicher Informations- und Kommunikationstechnologie (Medien, Radio, Handy etc.)
- Verhütung oder Bekämpfung von Katastrophen
- Öffentlicher Gesundheitsdienst
- Öffentliche Versorgung (Wasser, Energie, Lebensmittel)
- Öffentliches Abfallentsorgungs- und Kanalwesen
- Öffentlicher Verkehr. (WKO 2020: 1f)

Da ein Anstieg der Extremereignisse die Infrastruktur der Alpenregion bedroht und gefährdet, spielen die Gegenmaßnahmen zur Erhaltung des Lebens- und Wirtschaftsraumes eine erhebliche Rolle (vgl. MERGILI ET GLADE 2019: 37).

Daher ist das Ziel der APCIP, das gesamte Unternehmen resilienter zu machen und die Sicherung des Wirtschaftsstandortes Österreich und die österreichische Bevölkerung zu gewährleisten. Ebenso ist die Durchführung staatlicher Risikoanalysen und die Verstärkung von Vorsorgemaßnahmen gegenüber den Auswirkungen steigender Extremereignisse eine der zentralen Maßnahmen im APCIP. (vgl. HAGER 2019: 672ff)

5.4.4 Überlastfälle

Viele Schadensfälle und Auswirkungen in Österreich und dem Alpenraum sind auf Extremereignisse und daraus resultierenden Überlastfällen zurückzuführen. Dennoch existiert keine allgemeingültige Definition des Begriffs „Überlastfall“. Überlastfälle sind in der Regel Ereignisse, die aufgrund ihrer Intensität die Leistungsfähigkeit bestehender Schutzsysteme bzw. die Bemessungsgrenzen von Schutzbauwerken überschreiten. Sie zählen zu den verbleibenden Risiken und führen zu Schäden und Verlusten, die für die Menschen eine erhebliche Rolle spielen. (vgl. SCHNEIDERBAUER ET AL. 2019: 322ff) Um sich gezielter mit Strategien zum Umgang mit künftigen Ereignissen auseinanderzusetzen, muss man die Betrachtung physikalischer Prozesse zur Erklärung der Intensität der Gefahrenereignisse und zur Planung von baulichen Maßnahmen kontrollieren. Ebenso müssen gesellschaftliche Rahmenbedingungen untersucht werden, um das etwaige Schadenspotential zu bestimmen und die Entstehung der Gefahren zu reduzieren. (vgl. ebd.: 325f)

5.5 Häufigkeit und Intensität von Ereignissen

Basierend auf den Gefahrenzonenplänen der Wildbach- und Lawinerverbauung wurde das folgende Diagramm erstellt, um das Auftreten der Ereignisse hinsichtlich Häufigkeit und Intensität zu veranschaulichen. Das Diagramm enthält fast 20.000 dokumentierte Ereignisse einer Dekade. Ein Anstieg der Anzahl an Ereignissen lässt sich nun klar ableiten.

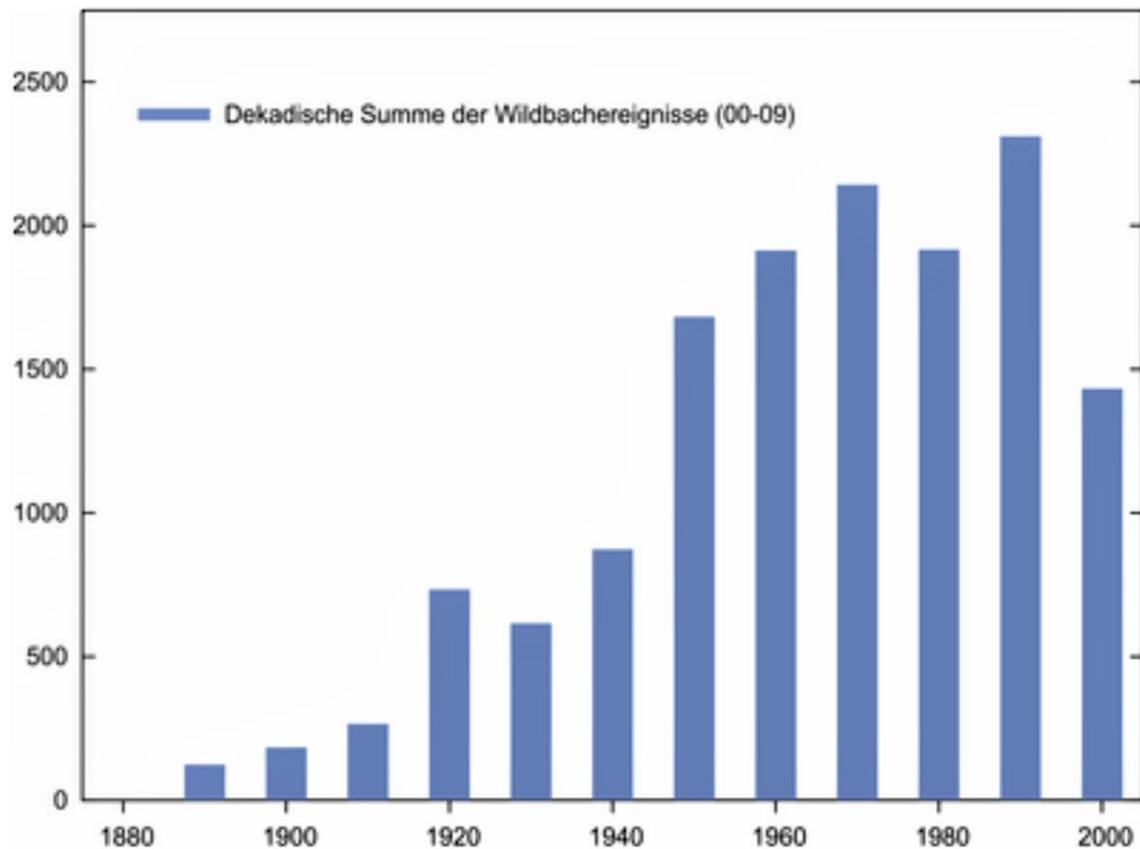


Abbildung 2: Dekadische Summe der Wildbachereignisse (BOKU) (vgl. BMLRT 2021: o.S.)

6. Gravitative Massenbewegungen im Alpenraum

Das folgende Kapitel verschafft einen Überblick über gravitative Massenbewegungen und beschreibt jene Phänomene, die im Alpenraum Österreichs eine zentrale Rolle spielen.

6.1 Sturzereignisse

Sturzereignisse betreffen vorwiegend Festgestein und werden je nach Dimension des betroffenen Materials in Steinschlag, Berg- und Felsstürze klassifiziert.

6.1.1 Bergsturz

Unter einem Bergsturz wird das Ablösen einer Masse, die beim Aufprall in Blöcke und Steine zerfällt, verstanden. Die Bewegung geht aus Bergflanken nieder und nimmt eine gewisse Fläche ein. (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 498f) In diesem Prozess spielt die Reibung zwischen einer Sturzmasse und dem Untergrund eine wichtige Rolle. Kurz nach der Auslösung des Prozesses gleitet die Sturzmasse entlang des Transporthanges. Mit fortlaufender Bewegung zerlegt sich die Masse in

Trümmerfragmente und bildet eine Mischung von Einzelpartikeln unterschiedlicher Korngrößen. (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 220) Bergstürze treten meist in Hochgebirgen und in Mittelgebirgen mit steiler Morphologie auf. Das größte derartige Ereignis im Alpenraum ist der Flimser Bergsturz, der aufgrund des Gletscherrückzugs und des Auftauens von Permafrost zustande gekommen ist. Weltweit treten Bergstürze öfter in Zusammenhang mit Erdbeben auf. (vgl. PRINZ ET AL. 2018: 491) Die Massereichweite der Bergstürze kann 10 km erreichen und weist zudem eine Geschwindigkeit von über 100 km pro Stunde auf. Somit können die Folgen von Bergstürzen extrem hohe Schäden verursachen (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 220).

6.1.2 Felssturz

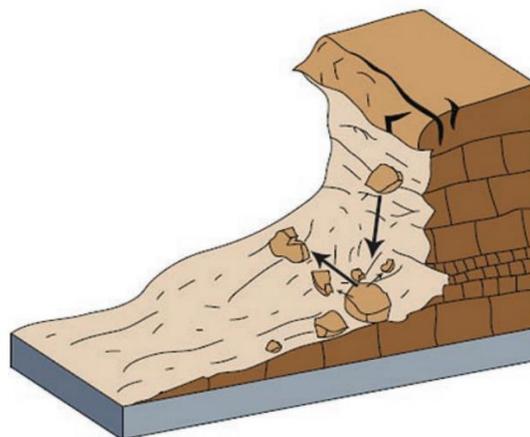


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Felssturzes (Quelle: HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 7)

Laut Poisel und Preh wird unter dem Prozess Felssturz der Abbruch einer größeren Felsmasse, die während des Abbruchs in Steine und Blöcke fragmentiert und in weiterer Folge als individuelle Fragmente talwärts stürzen, verstanden (PREH ET AL. 2019: 428). Laut Highland und Bobrowsky kommen Felsstürze an steilen und senkrechten Hängen, sowie in Küstengebieten und entlang felsiger Ufer von Flüssen und Bächen vor. Das Volumen des Materials kann von einzelnen Steinen und Erdklumpen bis hin zu massiven Blöcken variieren. Des Weiteren hängt die Rollgeschwindigkeit vom Aufprall und Abrollen vom Material von der Hangneigung ab. (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 6) Auslöser von Felsstürzen sind oft Starkniederschläge, die häufig durch hydrometeorologische Vorgänge vorbereitet werden. Ein lang anhaltender Niederschlag kann die offenen Gesteinsklüfte ausfüllen und dort zu großen Porenwasserdruck führen. Ein weiterer Auslöser ist der Permafrost. Die alpinen Felswände sind durch den dauergefrorenen Bereich

stabilisiert, versetzen sich jedoch durch die Klimaerwärmung in einen labilen Zustand und lösen sich aus der Felswand ab. Außerdem lässt sich feststellen, dass auslösende Faktoren von Felsstürzen häufig durch Menschen verursacht werden. Beispielsweise spielen der Hausbau in Hangbereichen, sowie der Bau von Verkehrsnetzen eine wichtige Rolle. Natürlich weisen klimatische Faktoren ebenso einen erheblichen Einfluss darauf. Oftmals ist die Ursache von Felsstürzen schwer zu benennen, da zum Zeitpunkt der Ursache und des Auslösens eines Felssturzes viele Jahre vergehen können. (GLADE ET AL 2017: 115ff) Gravitative Massenbewegungen werden durch die angeführten Faktoren nicht direkt ausgelöst, sondern eher dadurch begünstigt. Nichtsdestotrotz können Auswirkungen von Felsstürzen sehr gefährlich sein, zu Todesfällen und zu großen Schäden von Gegenständen, Infrastruktur und Straßen führen. Um die Gefahr einigermaßen zu verhindern, werden Warnschilder empfohlen. (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 7)

Nachfolgend werden die wichtigsten Faktoren und Auslöser von Felsstürzen im Detail beschrieben.

6.1.2.1 Felsgleitung, Felslawine und Erd-/Schuttstrom

Felsgleitungen, Felslawinen und Erd-/Schuttstrom kommen häufig in den Alpen vor und spielen daher für diese Arbeit eine wichtige Rolle. Sie stellen fast immer Extremereignisse dar, da sie durch ihre große Reichweite in den meisten Fällen große Auswirkungen auf die Gesellschaft haben. (vgl. ZANGERL ET AL. 2019: 387)

Unter Felsgleitung versteht man einen unterschiedlich schnellen Abgleitungsprozess eines geklüfteten Felsgesteins unter Einfluss der Gravitation entlang einer oder mehreren Ebenen oder gekrümmten Gleitzonen. Eine Felslawine ist eine Fließbewegung und wird durch Interaktion der einzelnen Gesteinskomponenten gekennzeichnet. Erd-/Schuttströme bestehen aus feinkörnigen Lockergesteinen und sind durch eine Kombination von Gleiten und Fließen gekennzeichnet. (vgl. ebd.: 386)

Langsame Prozesse einer Felsgleitung, Felslawine und Erd-/Schuttstrom bieten aufgrund gekennzeichneter Reaktivierungs- und Beschleunigungsphasen ausreichend Zeit, um betroffene Menschen zu evakuieren. Bei schnelleren Prozessen können Menschenleben, Siedlungs- und Wirtschaftsräume sowie

Infrastruktur gefährdet werden. Dennoch stellt die konkrete Vorhersage extremer Ereignisse eine große Herausforderung dar. Daher muss anhand einer Kombination der verschiedenen Untersuchungs- und Überwachungsmethoden eine vorzeitige Vorhersage ermöglicht werden, um mögliche Verluste zu minimieren. (vgl. ebd.: 383)

6.1.3 Steinschlag

Unter einem Steinschlag versteht man nach Evans und Hungr (1993) die Bewegung individueller, voneinander unabhängiger Felsfragmente, die mittels episodischer Einschläge mit dem Untergrund interagieren.

Die Definition von Steinschlag nach Kienholz et al. (1998) lautet folgendermaßen:

„Unter Steinschlag wird das Fallen, Springen und Rollen von isolierten Steinen und Blöcken verstanden“. (vgl. PREH et al. 2019: 427)

Aufgrund unterschiedlicher Größen der Felsfragmente besteht eine Unterscheidung zwischen Steinschlag und Blockschlag:

- Steinschlag: $<10\text{m}^3$
- Blocksturz: $>10\text{m}^3$ mit großen Einzelblöcken (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 489).

Steinschläge können zudem schwerwiegende Gefahren für Personen und Sachgüter darstellen. Die Gefahren werden durch die Intensität und die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt. (vgl. PREH et al. 2019: 430)

6.2 Rutschungen

Rutschungen sind gravitative hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fest- und/oder Lockergesteinen entlang einer Gleitfläche und können den Massenbewegungen zugeordnet werden (TOBLER ET GRAF 2016: 32).

Nach Prinz und Strauss werden Rutschungen folgendermaßen definiert:

„Rutschungen sind bruchlose oder bruchhafte, schwerkraftbedingte Massenverlagerungen aus einer höheren Lage eines Hanges oder einer Böschung in eine tiefere“. (PRINZ ET STRAUSS 2018: 469)

Rutschungen treten in unterschiedlichsten Formen auf und können je nach Untergrund, Wasseranteil und Gesteinsbeschaffenheit anders verlaufen (vgl. TOBLER ET GRAF 2016: 32). Sie bewegen sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und treten oft an künstlich und natürlich übersteilten Hängen auf. Die Geschwindigkeit variiert von sehr langsam bis extrem schnell und/oder spontan ausbrechend. (vgl. GLADE ET AL. 2017: 116) Während sich permanente Rutschungen langsam und kontinuierlich bewegen, treten spontane Rutschungen schnell und plötzlich auf (vgl. TOBLER ET GRAF 2016: 32). Die Situation am Hang, beispielsweise die Art, wie die Geländeoberfläche geformt ist, welches Gestein ansteht, wie viel Wasser und Material verfügbar sind und wie stark der Boden verwittert ist, spielt beim Auftreten von Rutschungen eine besonders wichtige Rolle (vgl. GLADE ET AL. 2017: 116). Ein natürlicher Auslöser von Rutschungen ist die Veränderung in der Neigung oder Höhe eines Hanges bzw. einer Böschung. Bei den auslösenden Faktoren unterscheidet man zwischen langfristig, geogenen Prozessen (z.B. Verwitterung, Gebirgsauflockerung, Gebirgsentfestigung) und kurzfristig geogenen oder äußeren Einflüssen (z.B. Niederschläge, Änderung des Grundwasserstandes, Belastungsänderung, Untergrabung oder Unterspülung und Erschütterungen). Resümierend ist festzustellen, dass langfristig, geogene Prozesse das Gleichgewicht eines Hanges über einen längeren Zeitraum hinweg schwächen. Ebenso tragen kurzfristige Prozesse und äußere Einflüsse zu einer Destabilisierung von Hängen bei. (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 470f)

Weitere Auslöser sind die Wirkung des Wassers, wie zum Beispiel Starkniederschläge, Regenschmelze, Änderung des Grundwasserspiegels, Wasserstandsänderungen an Küsten etc., sowie weitere auslösende Einflüsse, wie lang anhaltende Trockenperioden, Permafrost und Schneeschmelze etc. (vgl. CRUDEN 1996: 5). Das wesentliche Problem bei intensiven Starkniederschlägen ist, dass überschüssiges Wasser in tiefere Schichten gelangt und dadurch zu einer Erhöhung des Grundwasserspiegels führt. Die Intensität des Niederschlags begünstigt die Geschwindigkeit einer Rutschung. (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 470f) Viele Untersuchungen haben nach Röhlich und Andrecs gezeigt, dass besonders die veränderten Hangdrainagen, der Siedlungs- und Wegebau und dränierte agrarwirtschaftlich genutzte Flächen im Hangbereich einen großen Einfluss auf das Rutschungsverhalten haben (vgl. GLADE ET AL. 2017: 117). Prinz und

Strauss fügen hinzu, dass jene Hänge, an denen große Rutschungsbewegungen stattfinden, durch Kies- und Kalkgesteine, Basalte und Sandgesteine gekennzeichnet sind, die durch das leichte Eindringen des Wassers in den Untergrund eine ideale Grundvoraussetzung für die Auslösung einer Rutschung darstellen. (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 472) Cruden betont die menschlichen Auslöser solcher Rutschungen, wie zum Beispiel die Belastung der Umwelt, Abholzungen, Absenkungen, Bergbau sowie Wasseraustritt aus Versorgungsleitungen (vgl. CRUDEN 1996: 3).

6.2.1 Rutschungstypen

Es gibt unterschiedliche Rutschungstypen wie die Translations- und Rotationsrutschungen, sowie komplexe und kombinierte Rutschungen, die in diesem Abschnitt im Detail beschrieben werden.

6.2.1.1 Rotationsrutschung

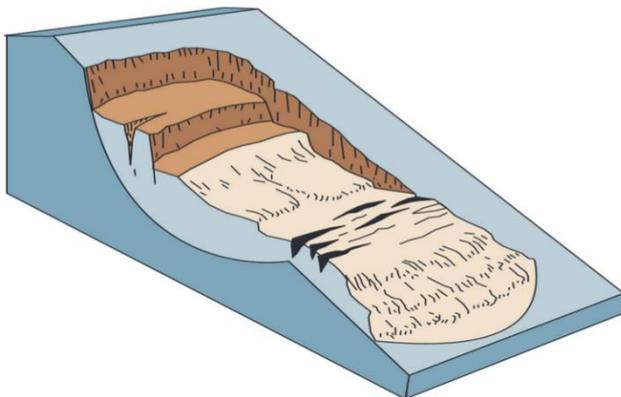


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Rotationsrutschung (Quelle: HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 11)

Unter Rotationsrutschung versteht man eine rotationsförmige Bewegung von Fest- und Lockergestein um eine Achse (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 210). Hierbei handelt es sich um eine Rutschung, bei der die Bruch- bzw. Scherfläche konkav nach oben gekrümmt ist und die Rutschbewegung grob rotierend um die Achse erfolgt, die parallel zur Bodenoberfläche und quer zur Rutschung verläuft (vgl. CRUDEN 1996: 2). Typisch für Rotationsrutschungen ist der geringe Grad der internen Verformung der bewegten Masse. Ihre Größe ist ziemlich variabel und dehnt sich von wenigen Quadratmetern bis zu großen Körpern mit mehreren Hektar aus. (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 210) Zudem kann die Bewegung auf einer oder mehreren Flächen stattfinden, die sich gegenseitig ergänzen oder ablösen (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 492).

Die Bewegungsgeschwindigkeit umfasst eine weite Spannbreite und variiert von extrem langsam (wenige cm pro Jahr, beispielsweise weniger als 0,3 Meter in fünf Jahren) bis zu schnell (mehreren m pro Sekunde/Tag/Monat) (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 10). Man kann nicht nur beobachten, dass sich eine Rotationsrutschung im Laufe des Prozesses zu einem Fließprozess transformiert sondern auch, dass sich die Masse während des Bruchprozesses durch weitere Rotationsmechanismen in mehrere Schollen zerlegt (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 210). Auslösende Faktoren nach Dikau et al. sind:

- steile Hänge
- wenig konsolidierte Tone, Hangausbisse von Tonen
- Schichtenfolge von durchlässigem über wenig durchlässigem Gestein
- technische Hangunterscheidung
- Hangfußerosion durch Flüsse und Wellen
- Erhöhung des Grundwasserspiegels
- Starkniederschläge
- Schneeschmelze
- Erdbeben (DIKAU ET AL. 2019: 213)

Rotationsrutschungen können Straßen, Infrastruktur und Lebensräume beschädigen, stellen aber bei langsamen Bewegungen keine lebensbedrohliche Gefahr dar. (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 10).

6.2.1.2 Translationsrutschung

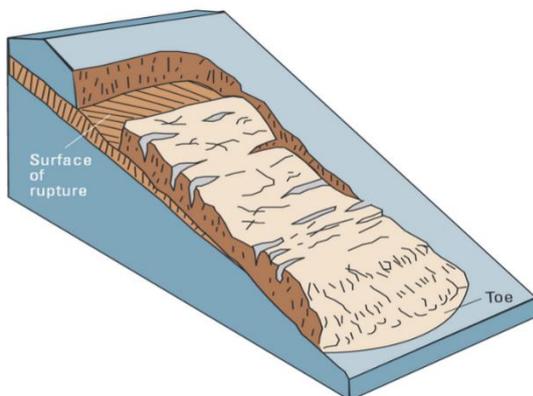


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer Translationsrutschung (Quelle: HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 13)

Bei einer Translationsrutschung spricht man von mehrheitlich ebenen oder abgestuften, hangauswärts gerichteten Gleitflächen (TOBLER ET GRAF 2016: 32). Hierbei handelt es sich um eine Bewegung entlang einer kreisförmigen Scherfläche

(vgl. CRUDEN 1996: 2). Die innere Struktur der Masse ändert sich im Hangfußbereich nur minimal. Richtet sich die Rutschungsmasse über eine bestimmte Distanz senkrecht zur Bewegungsrichtung entlang eines Hanges und weitet sich aus, so nimmt diese eine zylindrische Form an. Die zylindrische Gleitfläche ist daher parallel zur Rotationsachse der Rutschung. (vgl. CRUDEN ET VERNES 1996: 27f) Die Auslösung einer Translationsrutschung erfolgt dann, wenn die Scherfestigkeit des Fest- oder Lockergesteins durch die Scherspannungen am Hang überwunden wird (DIKAU ET AL. 2019: 208). Laut Dikau et al. kann sich die Gleitfläche bereits bei sehr geringen Hangneigungen entwickeln. Es kann durchaus vorkommen, dass nach der Ablösung und Bewegung der gleitenden Masse eine Hohlform im Rückhang durch den Massenverlust gebildet wird. Diese Hohlform wird als Graben bzw. Grabenbruch bezeichnet. Die Auslöser einer Translationsrutschung sind u.a. Versteilung bzw. Entlastung, erosive Prozesse, künstliche Eingriffe wie Belastungen durch technische Bauten oder Sedimentauftrag und Böschungsversteilung, oder aber auch hohe Grundwasserstände und Porenwasserdrücke. Des Weiteren weisen Translationsrutschungen unterschiedliche Typen auf:

- Translationsförmige Blockrutschung
- Schollenrutschung (Blattanbruch, Blaiken)
- Felsgleitung
- Schuttrutschung. (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 208)

Laut Highland und Bobrowsky zählen Translationsrutschungen zu den weltweit am häufigsten vorkommenden Rutschungen. Sie sind in der Regel flacher als Rotationsrutschungen und reichen von einem kleinen Maßstab bis zu größeren Erdrutschen. Da die Prozessgeschwindigkeit sehr variabel ist, an eine Rutschung über mehrere Monate nur einige Zentimeter rutschen, während sie ebenso in ein paar Tagen mehrere Meter verlaufen können. (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 12)

Nimmt die Geschwindigkeit einer Translationsrutschung zu, so kann sich die Erdrutschmasse von Translationsbrüchen auflösen und zu einem Murgang entwickeln, der lebensbedrohlich werden, Flüsse stauen und Überschwemmungen verursachen kann. Bei einem langsameren Verlauf kann man mit Schäden von Sachgütern und Lebensräumen rechnen. Um Translationsrutschungen verhindern zu können, gibt es verschiedene Abhilfemaßnahmen, die von Fachleuten ausgeführt

werden sollten. Eine dauerhafte Stabilisierung von Translationsrutschungen an mäßig steilen bis steilen Hängen ist sehr schwierig. (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 12) Laut Highland und Bobrowsky besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit des wiederholten Auftretens in Gebieten, in denen sie in der Vergangenheit aufgetreten sind, wie zum Beispiel Gebiete, die häufig starken Erdbeben ausgesetzt sind (vgl. ebd.: 13).

6.2.1.3 Komplexe Rutschungen

Laut Cruden und Varnes weisen komplexe Rutschungen eine innere Deformation auf und bilden dadurch Scherflächen und Gräben. Hierbei handelt es sich um eine rückschreitende, zusammengesetzte Bewegung mit überwiegend feuchtem oder nassem Material. (vgl. CRUDEN ET VARNES 1996: 30f)

6.2.1.4 Kombinierte Rutschungen

Unter kombinierten Rutschungen versteht man eine Gleitfläche, die unterschiedlich gekrümmt ist und sich aus ebenen Bruchflächen wie Verwitterungszone, Schichtung, Klüftung und Störung zusammensetzt. Eine starke Zerr- und Scherbeanspruchung der Rutschmasse ist meist die Folge einer kombinierten Rutschung. Bei größerer Horizontalbewegung kann es sogar zu einer typischen Grabenbildung am oberen Abriss führen. (vgl. PRINZ ET STRAUSS 2018: 493)

6.2.2 Rutschungsarten

Nachfolgend werden zwei Rutschungsarten, und zwar die permanenten und die spontanen Rutschungen erläutert.

6.6.3.1 Permanente Rutschungen

Permanente Rutschungen verschieben sich hangabwärts über einen längeren Zeitraum kontinuierlich gleichmäßig und können Zonen differenzierter Bewegungen aufweisen. Sie können durch außergewöhnliche Witterungsverhältnisse wie Schneeschmelzen, langanhaltende und/oder starke Niederschläge und durch Karst, auftauenden Permafrost oder eine Störung des Gleichgewichts durch Erosion auftreten. Gleitflächen bilden sich in tonreichen, verwitterten und plastischen

Lockergesteinen, die aus Gesteinen oder durchlässigem Lockermaterial bestehen. (vgl. TOBLER ET GRAF 2016: 33)

6.6.3.2 Spontane Rutschungen

Spontane Rutschungen treten plötzlich auf und sind schnell abgeleitete Massen. Nach Hunger et al. liegt die Ursache einer spontanen Rutschung in der plötzlichen Reduktion von Scherfestigkeit durch Reduktion des Reibungswinkels, Zunahme des Porenwasserdrucks und/oder Kohäsionsverlust. Sie ereignen sich häufig als Sekundärprozess von permanenten Rutschungen in überstellten Hangpartien und können große Volumina von bis zu mehreren Hunderttausend Kubikmetern umfassen. (ebd.: 34)

6.3 Muren

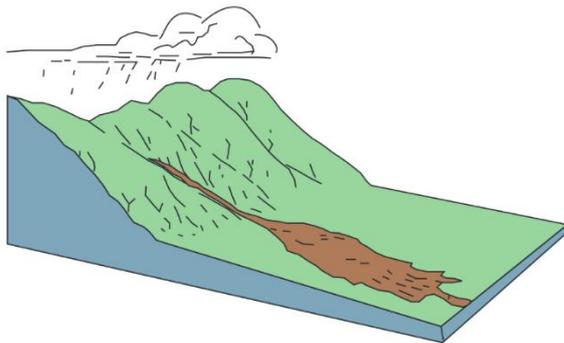


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines Murgangs (Quelle: HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 17)

Muren nehmen bei der Klassifizierung gravitativer Massenbewegungen einen besonderen Platz ein. Generell sind sie dem Prozess des Fließens zugeordnet und beinhalten Prozesseigenschaften des Rutschens und des Stürzens. Muren sind Ströme bestehend aus Wasser, Gestein und Boden. Je nach Zusammensetzung wird der Prozess in Schlammlawinen, Erdstrom und Schuttstrom weiter unterteilt. (vgl. NOE SLIDE 2021: o.S.) Wenn eine Rotations- oder Translationsrutschung an Geschwindigkeit und ihre innere Masse an Wasser gewinnt, kann sie sich gelegentlich zu einem Murgang entwickeln. Die Geschwindigkeit der Fortbewegung eines Murgangs variiert von schnell bis extrem schnell (ca. 56 km pro Stunde), je nach Konsistenz und Hangneigung. (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 16) Laut Dikau et al. sind Murgangsysteme durch die Komponenten Murgerinne, Murkopf, Anrissgebiet und Murkegel charakterisiert (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 211).

Auslösende Faktoren sind vor allem klimatische Gegebenheiten, sowie Vegetationsänderungen bzw. ein erhöhter Wasserinput im Untergrund durch Starkniederschläge, intensive Schneeschmelze und langandauernde Regenperioden. Laut Tobler und Graf ist ein hoher Wasseranteil für eine hohe Prozessgeschwindigkeit verantwortlich. (vgl. TOBLER ET GRAF 2016: 34) Dikau et al. betrachtet die starke Durchfeuchtung des Materials als eine der wichtigsten Auslöseprozesse (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 214). Des Weiteren können Bereiche, die durch die Vegetation geschützt sind, im Falle einer Rodung und eines Extremereignisses zu Quellgebieten von Muren werden. Untersuchungen über Veränderung der Muraktivität, die auf klimarelevante Parameter zurückzuführen sind, sind in diesem Kontext von großer Bedeutung. (vgl. GLADE ET AL. 2017: 116) Murgänge treten weltweit auf und sind in steilen Rinnen und Canyons, sowie in vulkanischen Gebieten mit schwachem Boden verbreitet (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 16). In Österreich treten Murgänge und Hangrutschungen vorwiegend als Einzelprozesse auf, die aber aufgrund der Auslöser wie Starkniederschläge zeitgleich freigesetzt werden können. Dadurch sind Muren und Hangrutschungen vor allem für raumplanerische Fragestellungen bedeutsam. (vgl. GLADE ET AL. 2019: 464) Zudem können Murgänge tödlich sein, da sie große Felsbrocken und andere Trümmerteile enthalten können und sehr schnell, ohne jegliche Vorwarnung auftreten können. Laut Dikau et al. besitzen Murgänge ein sehr hohes Erosionspotential und können in Abhängigkeit von ihrer Viskosität und Hangneigung große Distanzen überwinden (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 213). Außerdem können sie die Qualität des Wassers beeinträchtigen, indem sie große Mengen an Schlamm und Geröll ablagern (vgl. HIGHLAND ET BOBROWSKY 2008: 16). Da es nahezu unmöglich ist, gravitative Massenbewegungen komplett zu verhindern, sollte darauf geachtet werden, Häuser nicht in steilen Rinnen, in denen es in der Vergangenheit bereits zu Murgängen gekommen ist oder die aufgrund von Waldbränden, der Bodenbeschaffenheit oder anderen damit verbundenen Faktoren anderweitig anfällig sind, zu bauen. Um das Auftreten von Murgängen zu reduzieren helfen Murgangbecken, um Flüsse einzudämmen und jeweilige Warnsysteme, die bekannt geben, bei welchen Niederschlagsschwellen Murgänge ausgelöst werden. Zudem sind Evakuierung, Vermeidung und/oder Umsiedlung von Risikogebieten die beste Methode, um Verletzungen, Schäden und Verlust von Menschenleben zu verhindern. (vgl. ebd.: 17)

In Österreich konnten seit dem Jahr 1800 ca. 5000 Murgänge registriert werden, von denen 230 Ereignisse als extrem bewertet worden sind. Anhand der Abbildung kann man die zeitliche Entwicklung der dokumentierten Muren sowie dessen Verlauf der Zunahme deutlich erkennen. (vgl. KAITNA ET AL. 2019: 494)

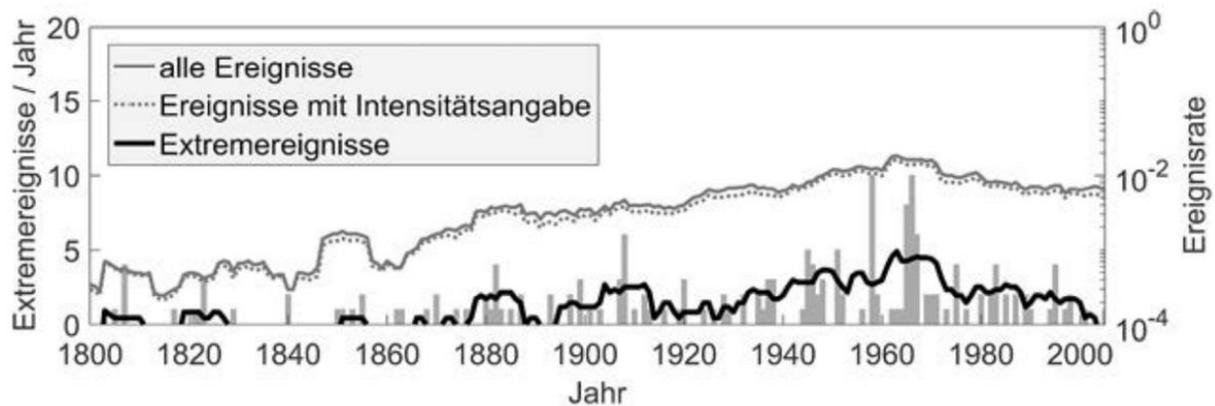


Abbildung 6: Zeitliche Entwicklung und Zunahme von Muren (Quelle: KAITNA ET AL. 2019: 494)

Ein besonderes Beispiel für Murgänge ereignete sich in der Bruchkessel „Schesatobel“ oberhalb von Bludenz, in Vorarlberg. Das Phänomen wurde als größter Murbruch der Alpen dokumentiert und zeigt Auswirkung menschlicher Eingriffe in die Natur. Nach dem ersten Murgang im Jahre 1802 erfolgten mehr als 15 weitere Murereignisse über etwa 100 Jahre, wodurch 40 Mio. m³ Lockergestein erodiert und abtransportiert wurde. Ausgedehnte Waldrodungen und Erosionsnarben durch Holzbringung sind die entscheidenden Ursachen für die Auslösung dieser Murgänge. Bisher wurden 22,5 Mio. Euro in Schutzmaßnahmen investiert. (vgl. BMLRT 2021: o.S.)

7. Klimawandel

Der Klimawandel ist eines der wichtigsten Ursachen gravitativer Massenbewegungen und bildet eine große Herausforderung für den Alpenraum Österreichs.

Der Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) analysiert die Auswirkungen des Klimawandels auf einer wissenschaftlichen Basis und veröffentlicht regelmäßig Berichte über die Veränderung des globalen Klimas. In dieser Hinsicht gelingt es, Maßnahmen des Klimaschutzes sowie Anpassungsstrategien zu entwickeln, um den Auswirkungen des Klimawandels entgegenzuwirken. (vgl. BMLRT 2021: o.S.)

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf die Extremereignisse im Alpenraum. Ebenso werden Fallbeispiele repräsentiert und die Frage, inwiefern die veränderten klimatischen Bedingungen das Auftreten von Extremereignissen begünstigen, aufgegriffen.

7.1 Klimaänderungen im Allgemeinen

Die steigende Weltbevölkerung hat sich in den letzten Jahrhunderten massiv entwickelt. Das Überschreiten der natürlichen Tragfähigkeit der Erde ist mit einer enormen Steigerung im Energieverbrauch und der Landnutzungsfläche gepaart. Die Lufttemperaturen sind in den letzten Jahrzehnten erheblich gestiegen und die damit verbundenen Durchschnittstemperaturen in Europa waren wärmer als in jedem vergleichbaren Zeitraum. (vgl. STOFFEL ET AL. 2014: 2) Laut Berichte des IPCC wird sehr wahrscheinlich zwischen 2030 und 2052 ein Temperaturanstieg von 1,5°C und bis Jahrhundertende ein Temperaturanstieg von 2°C erreicht werden (vgl. IPCC 2019: 8). Derzeit sind die anthropogenen Treibhausgasemissionen und Landnutzungsänderungen die größten Ursachen für den globalen Klimawandel. Es gibt aber noch viele weitere anthropogen verursachte Aktivitäten, die auf die beobachtbaren Klimaänderungen zurückzuführen sind, wie zum Beispiel:

- Verbrennung fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl, Gas)
- Landnutzungsänderungen und Landwirtschaft (Abholzung, Versiegelung etc.)
- Prozessbezogene Emissionen der Industrie (bspw. CO₂ Freisetzung bei Zement- und Kalkerzeugung).(vgl. HAIMBERGER ET SEIBERT 2014: 150)

Im Pariser Klimaabkommen hat sich die Weltgemeinschaft verpflichtet, die globale Erwärmung bis spätestens Ende des Jahrhunderts auf 1,5°C, bezogen auf das vorindustrielle Temperaturniveau, einzuschränken. Um dies zu ermöglichen, müsste man die anthropogenen Treibhausgasemissionen weltweit bis spätestens 2060 auf null bringen und anschließend die Treibhausgase aus der Atmosphäre entfernen. (vgl. OLEFS ET FORMAYER 2021: 20) Laut IPCC wird die Erwärmung durch anthropogene Emissionen für Jahrtausende bestehen bleiben und weiterhin langfristige Änderungen im Klimasystem bewirken (vgl. IPCC 2019: 9). Obwohl man den globalen Klimawandel nicht mehr aufhalten kann, bestehen derzeit Anpassungsstrategien, die eine Minderung des Klimawandels auf verschiedenen Ebenen zu Folge haben (vgl. IPCC 2019: 9). Jede/r sollte einen Beitrag dazu leisten, um den Klimawandel zu verlangsamen. Dafür kann man auf bestimmte Strategien

wie z.B. der Senkung des Energieverbrauchs setzen. (vgl. HÖPPE 2008: 114)
Zusammengefasst spielt eine erforderliche Transformation der Gesellschaft und deren Handlungen in Bezug auf die Anpassungsstrategien eine erhebliche Rolle (vgl. OLEFS ET FORMAYER 2021: 20). Außerdem hängen die klimabedingten Risiken von Geschwindigkeit und Ausmaß der Erwärmung, Entwicklungsstand und Vulnerabilität, geographischer Lage sowie der Wahl und Umsetzung von Anpassungs- und Minderungsmöglichkeiten ab (vgl. IPCC 2019: 9).

7.2 Einfluss des Klimawandels auf Extremereignisse im Alpenraum

Die europäischen Alpen sind sehr stark vom Klimawandel betroffen und zeigen eine hohe Anfälligkeit gegenüber klimabedingten Gefahren (vgl. KEILER ET AL. 2010: 2461). Laut IPCC haben die Alpengletscher seit 1850, also ihrem letzten Höhepunkt, 56% an Fläche verloren (vgl. OLEFS ET FORMAYER 2021: 28). Die relevantesten Klimaveränderungen, die einen Einfluss auf den Alpenraum haben, sind die steigenden Temperaturen, Veränderungen der Niederschläge, sowie der Gletscherbedeckung und des Permafrosts. Demnach wird im Alpenraum ein höherer Temperaturanstieg als im globalen Vergleich gemessen. (vgl. KEILER ET AL. 2010: 2461)

Es ist natürlich nicht zu verleugnen, dass diese Veränderungen das Auftreten von Extremereignissen im Alpenraum begünstigen. Der IPCC misst vor allem dem Zusammenhang zwischen den intensiveren Extremereignissen und der globalen Erwärmung besondere Bedeutung zu. (vgl. HÖPPE 2008: 113) Der Klimawandel wirkt sich vor allem negativ auf die alpinen Gletscher aus, da diese auf Änderungen des Klimas sensibel reagieren. Die Reaktion eines Gletschers hängt von der Steilheit und Dicke des Eises, der Form des Gletscherbetts, der Länge, Höhenlage und Exposition der Sonne ab. (vgl. KUHN 2010: 49)

Die vermehrten extremen Hitzeereignisse sind für das Verschwinden der alpinen Gletscher verantwortlich. Diese sind nicht nur von der Intensität und Frequenz sondern auch von der Dauer abhängig. (vgl. PERKINS-KIRKPATRICK ET PITMAN 2018: 2)

Neben dem Temperaturanstieg sind hochintensive, kurz anhaltende Regenstürme und lang anhaltende Niederschlagsereignisse mit geringer Intensität eines der Hauptursachen von Extremereignissen im Alpenraum, die durch den Klimawandel

begünstigt werden (vgl. STOFFEL ET AL. 2014: 2). Extremereignisse, die im Alpenraum vorkommen und durch den Klimawandel begünstigt werden, sind u.a. Rutschungen, Muren und Felsstürze, die auf intensivere Starkniederschläge, längere Trockenperioden, Schneeschmelze oder Permafrostveränderungen zurückzuführen sind. (vgl. GLADE 2014: 559)

Zusammenfassend konnte durch Messungen und Beobachtungen festgestellt werden, dass in Zukunft mit stärkeren Aktivphasen zu rechnen ist, da ein direkter Zusammenhang zwischen den Klimawandelfaktoren und der Reaktivierung von gravitativen Massenbewegungen besteht. (vgl. TOBLER ET GRAF 2016: 37) Dennoch muss darauf geachtet werden, dass man die Ursachen nicht nur auf den Klimawandel reduziert. Die vielfältigen auslösenden Faktoren der Naturgefahren und gravitativen Extremereignissen werden in unterschiedlichster Weise beeinflusst. Daher muss das Zusammenwirken von klimarelevanten Ereignissen in erster Hinsicht in ihrer Gesamtheit betrachtet werden. (vgl. GLADE et al 2017: 119) Laut Patek sind klimarelevante Faktoren nur ein Indiz für die Veränderungen der Häufigkeit bestimmter Extremereignisse und nicht der direkte Grund dafür (vgl. PATEK 2007: 5). Somit kann man schlussfolgern, dass der Klimawandel nicht alleine ausreichend ist, um die beobachteten Veränderungen zu erklären. Einige andere Umweltraumbedingungen, wie zum Beispiel Vegetation, Böden, Wasserführung der Flüsse, sowie die veränderten Gesellschaftssysteme spielen eine wichtige Rolle und wirken bei der Erklärung von Veränderungen im Alpenraum zusammen. (vgl. MERGILI ET GLADE 2019: 36) Eine klare Trennung zwischen den vom Menschen beeinflussten Faktoren und dem Klimawandel ist sehr schwierig (vgl. GLADE ET AL. 2017:116).

Ferner lässt sich hinzufügen, dass bis dato keine zuverlässige Prognose für den Alpenraum verfügbar ist. Daher handelt es sich primär um Vermutungen, da keine exakten Vorhersagen über die Auswirkung der Klimaänderung auf alpine Naturgefahren bzw. Extremereignisse bestehen. Zusammenfassend kann man sagen, dass man aufgrund der vorliegenden Klimaszenarien eine Zunahme einiger Naturgefahren in ihrer Häufigkeit und Intensität vermutet. Das Ausmaß dieser Zunahme kann jedoch kaum prognostiziert werden. Außerdem muss man beachten, dass sämtliche Klimafaktoren einer Saisonalität unterliegen. Wenn es sich um den Zusammenhang des Klimawandels und den Auswirkungen extremer Ereignisse

handelt, muss die Jahreszeit berücksichtigt werden. Es wird auf jeden Fall vorausgesehen, dass die Bedrohung der Naturkatastrophen zunehmen wird und der Klimawandel dabei eine erhebliche Rolle spielt. (vgl. BMLRT 2021: o.S.)

Die folgende Abbildung zeigt den Einfluss der Erwärmung auf die Wahrscheinlichkeit extremer Ereignisse.

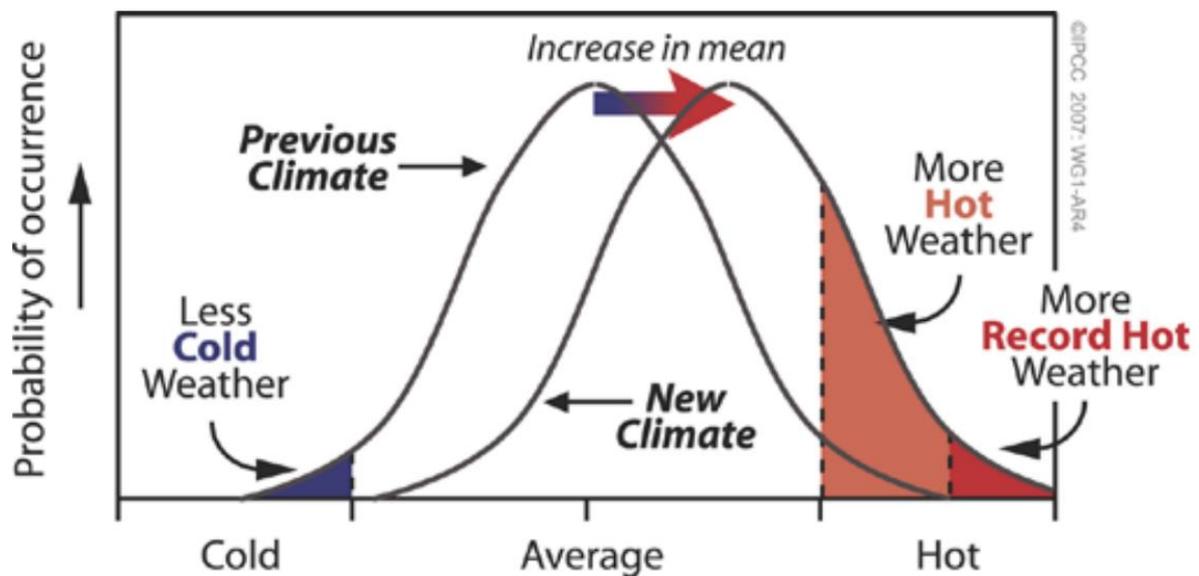


Abbildung 7: Einfluss der Erwärmung auf die Wahrscheinlichkeit extremer Ereignisse. (Quelle: PERKINS-KIRKPATRICK ET PITMAN 2018: 2)

7.2.1 Einfluss des Klimawandels auf Permafrost, Schnee- und Eisschmelze

Der Permafrost ist auf kleinste Klimaänderungen sehr empfindlich. Die geringste Veränderung des Klimas führt zu einer Änderung der Verteilung von Permafrost und der Permafrostbedingungen. Ein grundlegender Faktor für die Änderung von Permafrost ist die steigende Lufttemperatur, die Änderung der Schneedecke und der Zusammenhang mit der Sonneneinstrahlung, die zu oberflächlichen Auftauprozessen führen kann. Grundlegend kann das Auftauen von Permafrost die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Extremereignissen, wie zum Beispiel Bodenkriechen oder Rutschungen, auslösen. (vgl. GLADE 2014: 579)

Ein weiteres Phänomen ist die Eis- und Schneeschmelze. Sie wird ebenso durch die steigenden Temperaturen beeinflusst und erhöht die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Schuttmassen. Die Schneeschmelze sorgt vorbereitend dafür, dass der Untergrund feucht wird und so eine Auslösung neuer Rutschungen begünstigt wird. (vgl. ebd.: 560f) Beim Schneedeckenaufbau spielen die Niederschlagsmenge

und die Schneefallgrenze eine wichtige Rolle. Der Schnee ist stark von der Lufttemperatur und vom Niederschlag abhängig und reagiert innerhalb verschiedener Höhenlagen und Regionen unterschiedlich auf Klimaänderungen. (vgl. OLEFS ET FORMAYER 2021: 25) Bei Gebirgen unterhalb 1750m Meereshöhe ist ein Rückgang der Schneebedeckung deutlich sichtbar, währenddessen höhere Lagen der Wirkung der Klimaänderung in Bezug auf die Schneedeckendauer entgegenwirken. (vgl. SPEHN ET KÖRNER 2017: 407) Somit kann man schlussfolgern, dass extrem warme Temperaturen bzw. der Temperaturanstieg das Schrumpfen und Schmelzen der Gletscher und das Erwärmen und Auftauen von Permafrost und Schnee verursachen können. Diese Faktoren beeinflussen und verringern die Stabilität des Felshanges und begünstigen das Auftreten extremer Ereignisse. (vgl. STOFFEL ET AL. 2014: 7)

7.2.2 Einfluss des Klimawandels auf Steinschlag, Felssturz, Bergsturz, Kippung

Steinschläge, Felsstürze und Bergstürze werden neben Erdbeben und anthropogenen Aktivitäten auch durch meteorologische Parameter verursacht. Das Auftreten von Fels- und Bergstürzen kann demnach die Folge des Abschmelzens von Gletscher und des Permafrosts sein. Steinschläge können hingegen die Folge von Starkregen, Temperaturschwankungen und jährlichen Frostwechsel sein. Somit ist festzustellen, dass Sturzprozesse häufig durch den hydrologischen Porenwasserdruck, d.h. Regenfälle und Schmelzwasser ausgelöst werden. (vgl. GLADE 2014: 568f)

Des Weiteren werden Kippungsprozesse in einigen wenigen Fällen durch das Ergebnis extremer Wetterbedingungen ausgelöst, daher kann die klimatische Situation für die Auslösung des Kippungsprozesses von Bedeutung sein. Die auslösenden klimatischen Faktoren sind in kurzen und langen Zeitskalen unterschiedlich. In kurzen Zeitskalen können das Bodenwasser, sowie Tau- und Gefriervorgänge, die durch Niederschlag verursacht worden sind, prozessauslösend sein. In langen Zeitskalen ist der klimatische Einfluss vor allem auf die Schwächung des Festgesteins durch Verwitterung verursachte Intensivierung und Vertiefung des Trennflächengefüges zurückzuführen. (vgl. DIKAU ET AL. 2019: 206).

7.2.3 Einfluss des Klimawandels auf Rutschungen und Muren

Langandauernde Niederschläge und kurze Starkniederschläge sowie hohe Temperaturen erhöhen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Rutschungen und Muren. (vgl. GLADE 2014: 560) Das zukünftige Fortsetzen dieser Situation wird das Vorkommen begünstigen. (vgl. TOBLER ET GRAF 2016: 37)

Nicht nur Starkniederschläge, sondern auch auftauender Permafrost sowie der Gletscherrückzug führen zu Hanginstabilitäten und sorgen somit für vermehrtes Auftreten dieser Extremereignisse. (vgl. ebd.: 36) Ebenso können sie durch das von Permafrost frei werdenden Moränenmaterial oder Schutthalden zunehmen. (vgl. GLADE 2014: 567). Dennoch ist aufgrund bisheriger Untersuchungen kein zwingender und eindeutiger Zusammenhang nachweisbar, da eine eindeutige Trennung zwischen den Konsequenzen menschlicher Eingriffe und den Auswirkungen des Klimawandels nicht direkt möglich ist. (vgl. GLADE ET AL. 2017: 117)

Im Jahre 2019 wurden ausschließlich 43% der gravitativen Ereignisse durch lang anhaltende Regenereignisse, 34% durch Starkregen und Gewitter, weitere 18% durch Starkregen und Gewitter in Kombination mit Hagel und 5% durch die Kombination Starkregen und Gewitter mit Schneeschmelze ausgelöst (vgl. HÜBL ET BECK 2019: 28).

7.3 Klimaszenarien für Österreich und den Alpenraum

Anhand der Prognosen des IPCC kann man ableiten, dass die Lufttemperatur in Österreich seit Ende des 19. Jahrhunderts um ca. 2°C gestiegen ist. Demnach wird für die nahe Zukunft (2021-2050) ein Temperaturanstieg von 1,3°C im Vergleich zur Klimanormalperiode (1971-2000) erwartet. Für die ferne Zukunft (2071-2100) wird die Temperatur weniger als 2°C, bei tiefgreifenden Klimaschutzmaßnahmen ca. 2°C und bei keinen Klimaschutzmaßnahmen um 4°C ansteigen. (vgl. OLEFS ET FORMAYER 2021: 38) Laut APCC (Austrian Panel on Climate Change) zeigt die Temperaturänderung im Alpenraum in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts eine mittlere Erwärmung von 1,5°C im Winter und 1,7°C im Sommer.

Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts wird eine Niederschlagsänderung von einer mittleren Zunahme von 3,7 % im Winter und einer Abnahme von 3,1 % im Sommer erwartet. Eine Niederschlagszunahme wird eher in den nördlichen Alpen im Frühling, Sommer und Herbst erwartet, während mit einer Abnahme im südlichen und

westlichen Teil des Alpenraumes zu rechnen ist. Einer weiteren Studie zufolge werden die beiden Perioden 1963-2006 und 2007-2051 für Österreich verglichen und die Intensitäten nehmen bei 30-jährigen Niederschlagsereignissen um 17-26% zu. Die extremsten Tagesniederschläge sollen demnach in der Osthälfte Österreichs in der Periode 2071-2100 um bis zu 40% stärker werden. (vgl. ZAMG o.J.: o.S.) Gegen Ende des 21. Jahrhunderts ist mit einer deutlichen Tendenz zu trockeneren Verhältnissen im Sommer (ungefähr -20%) und feuchteren Verhältnissen im Winter (etwa +10%) zu rechnen. (vgl. AHRENS ET FORMAYER 2014: 319ff) Die Klimaszenarien für 2071 bis 2100 zeigen eine Verdreifachung in der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Dürre im Vergleich zur Vergangenheit. Die Intensitäten sollten sich dabei verdoppeln (vgl. ebd.: 324). Somit ist festzustellen, dass eine Veränderung bzw. Zunahme der Temperaturextreme (heiße Tage) und Niederschläge zukünftig mit großer Sicherheit zu erwarten ist (vgl. OLEFS ET FORMAYER 2021: 39). Basierend auf den angeführten Temperaturextremen kann man daher eine Zunahme der großflächigen Extremereignisse im Alpenraum ableiten (vgl. AHRENS ET FORMAYER 2014: 329).

Betrachtet man die Schneelage, so kann man für die zukünftige Entwicklung einen direkten Zusammenhang mit der Temperatur erkennen. Szenarien zeigen mit großen Unsicherheiten, dass die Niederschlagszunahme im Winter zu mehr Schnee führen könnte. Andererseits zeigen Studien eine Abnahme der mittleren Schneehöhe im Zeitraum von 2021 bis 2050 um -10% bis -70%. Je nach Szenario wird sich die Schneedeckendauer um 2 Wochen bis 1 Monat am Winterbeginn und 1 bis 3 Monate am Ende des Winters verkürzen. (vgl. OLEFS ET FORMAYER 2021: 31f) Die moderate Verringerung der Schneedecke wird auch zukünftig zu häufigeren Reaktivierungen von Massenbewegungen führen (vgl. STOFFEL ET AL. 2014: 8). Des Weiteren wird aufgrund der Wärmeübertragung von einem langfristig, eisarmen Permafrost ausgegangen. Somit werden die kleinen und mittleren Gletscher Österreichs bis zum Ende des 21. Jahrhunderts sehr wahrscheinlich verschwunden sein. (vgl. OLEFS ET FORMAYER 2021: 31f) Auch die Sonnenscheindauer hat im Alpenraum in den letzten 130 Jahren um 10% zugenommen und wird dies auch in den nächsten Jahren beibehalten. (vgl. ebd.: 39) Die folgende Abbildung soll die vergangenen und zukünftig erwartenden Jahresmitteltemperaturen in Österreich grafisch veranschaulichen:

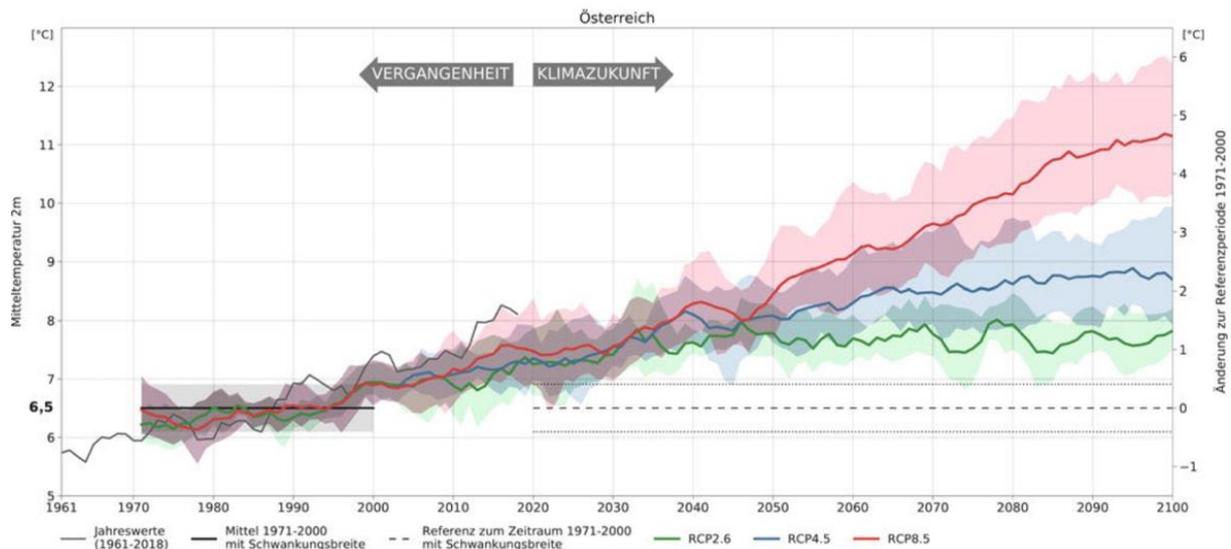


Abbildung 8: Gemessene vergangene und zukünftige erwartete Jahresmittelttemperaturen in Österreich. (Quelle: OLEFS ET FORMAYER 2021: 30)

Diese klimabedingten Änderungen werden einige Lebensräume und die Artenverbreitung im Alpenraum in den nächsten Jahrzehnten deutlich verändern (vgl. SPEHN ET KÖRNER 2017: 407). Zusätzlich werden Risiken für Gesundheit, Lebensgrundlagen, menschliche Sicherheit, Infrastruktur und Wasserversorgung zunehmen (vgl. IPCC 2019: 13).

Abschließend kann man von folgenden möglichen Folgen des Klimawandels für Naturgefahren bzw. gravitativen Massenbewegungen in den Alpen ausgehen:

- Erhöhung des Risikos für Rutschungen, Steinschläge und Muren durch die Veränderung der Vegetationsbedeckung sowie den Rückgang des Permafrosts der Gletscher in Hochlagen.
- Anstieg der Häufigkeit und Intensität von Hochwasserereignissen, ausgelöst durch die Zunahme der Winterniederschläge und den gleichzeitigen Anstieg der Schneefallgrenze oder die Zunahme extremer Niederschläge im Sommer.
- Regionale Zunahme von Trockenheit und Perioden extremer Niedrigwasserstände im Sommer.
- Ein genereller Trend einer Zunahme von alpinen Naturkatastrophen infolge des Klimawandels, obwohl man stark davon ausgeht, kann aus den dokumentierten Ereignissen nicht gesichert abgeleitet werden. (BMLRT 2021: o.S.)

8. Extremereignisse im Alpenraum

Das folgende Kapitel verschafft einen Überblick über extreme gravitative Massenbewegungen im Alpenraum, welche mit einer erhöhten Magnitude von gewöhnlichen Ereignissen abgegrenzt werden bzw. die dem Durchschnittswert abweichen und eine seltene bzw. unregelmäßige Wiederkehrwahrscheinlichkeit aufweisen. Sie werden im Kontext der bewegten Masse, der Bewegungsgeschwindigkeit, in Bezug auf die direkten und indirekten Konsequenzen und die potentiellen Einflüsse der Gesellschaft betrachtet. Zudem werden sie mit enormen Schäden und katastrophalen Auswirkungen auf Personen, Infrastruktur, Umwelt und Sachschäden in Verbindung gesetzt. (vgl. GLADE ET ZANGERL 2019: 380) Das nächste Kapitel soll prähistorische, historische und aktuellere Beispiele von Extremereignissen im österreichischen Alpenraum veranschaulichen, um zu zeigen, dass es sich bei Extremereignissen nicht nur um Gegenwärtiges handelt.

8.1 Fallbeispiele

Spuren von zahlreichen Naturkatastrophen im Alpenraum sind seit dem Ende der letzten Eiszeit von ca. 12.000 Jahren vorhanden. Extremereignisse traten in der Geschichte Österreichs immer wieder auf und werden zukünftig wieder eintreten. Einen Blick in die Vergangenheit ermöglicht uns eine bessere Vorbereitung für zukünftige Ereignisse. Aktuelle Beispiele sollen aber auch zeigen, dass Extremereignisse in Österreich existieren, potentiell gefährlich sind und Schäden verursachen können. Daher zählt die Ereignisdokumentation zu den wichtigsten Aufgaben des Naturgefahrenmanagements (vgl. BMLRT 2021: o.S.) Dieses Kapitel stellt daher die wichtigsten historischen und aktuellen Extremereignisse in anschaulicher Form dar.

8.1.1 Prähistorische Ereignisse

Die ersten dokumentierten Ereignisse kamen nach dem Rückzug der Gletscher der letzten Eiszeit vor. Die übersteilten Hänge von Tälern wurden bis dahin durch das Gletschereis stabilisiert. Aufgrund des fehlenden Eiswiderlagers und der einhergehenden Druckentlastung wurden diese instabil und lösten große Bergsturzereignisse aus. Ein prähistorisches Beispiel für die damals sich ereignenden Bergstürze war jene von Köfels im Ötztal, der sich vor ungefähr 9800

Jahren ereignete. Er verfügte über eine Geschwindigkeit von mehreren hundert Stundenkilometern, eine Fläche von 12 km² und ein Volumen von 2,0 bis 3,28 km³. Die Anzahl der Todesopfer blieb bis heute unbekannt. (vgl. BMLRT 2021: o.S.)

Ein weiteres prähistorisches Beispiel sind die Dobratsch Bergstürze, die im Jahre 1348 durch ein Erdbeben ausgelöst wurden. Übersiedlungen und Schäden der Vegetation, Straßen und Wegen waren die Folge. Ein weiterer Bergsturz ereignete sich im Jahre 1669 am Mönchensberg in Salzburg. Der Grund für die Auslösung war die unkoordinierte Aushöhlung des Bergfußes und nahm somit 250 Menschen das Leben. (vgl. MIKLAU ET HÜBL 2009: 45)

8.1.2 Historische Ereignisse

In den Jahren 1958 und 1959 traten folgende Extremereignisse auf:

- Fischbacher Alpen: Eines der extremsten Ereignisse in Österreich fand in der Region Fischbacher Alpen in der Steiermark statt. Zahlreiche Rutschungen und Hangabbrüche sowie Hochwasserereignisse wurden durch einen Extremniederschlag mit einer sehr intensiven Niederschlagsperiode ausgelöst. Insgesamt rutschten rund 10 Mio. m³ Gesteinsmassen ab.
- Millstättersee – Ossiachersee – Liesertal – Salzkammergut: Starke Niederschläge und Unwetter führten zu Hochwasserereignissen und zahlreichen Murabgängen. Insgesamt wurden 300.000 m³ Schotter abgelagert.
- Die angeführten Wildbachkatastrophen in der Steiermark und in Kärnten verursachten 14,5 Mio. € Schäden. Zudem wurden zahlreiche Gebäude und Straßen zerstört und 11 Menschen kamen ums Leben. (vgl. MIKLAU ET HÖBL 2009: 56)

In den Jahren 1965 und 1966 erfolgten drei Extremereignisse in Folge, die sogenannten „Herbst-Katastrophen“:

- Die aus der feuchten Warmluft entstehenden Niederschlagstagesummen entsprachen den vierfachen durchschnittlichen Monatssummen.
- In den Höhenlagen schmolzen Schneedecken und verstärkten somit die hohen Abflussraten in den Flüssen und Bächen.

- Durch die Auslösung von Murgänge und Hangrutschungen kamen insgesamt 64 Menschen ums Leben.
- Die Schäden der Extremereignisse waren so hoch, dass im Anschluss im Jahre 1966 ein Katastrophenfondsgesetz für eine auf Dauer gesicherte Basis für die Finanzierung des Schutzwasserbaus und der Wildbach- und Lawinenverbauung in Österreich geschaffen wurde. (vgl. ebd.: 59)

Ab 1965 ereigneten sich folgende Extremereignisse:

- Aufgrund eines Wolkenbruchs mit Hagelschlag in Kombination mit einem Starkniederschlag wurden Rinnen und Gräben aufgerissen und es kam zu einem extremen Murereignis am Enterbach in der Tiroler Gemeinde Inzing. Insgesamt wurden eine Fläche von über 52 ha vermurt, zwei Häuser zerstört und weitere 15 Häuser eingeschottert. Zudem gab es 15 Verletzte und drei Menschen, die ums Leben kamen. Dieses Ereignis unterstützte die Weiterentwicklung und die Regelung im Forsttechnischen Dienst im Forstgesetz 1975. (vgl. ebd.: 62f)
- In den Jahren 1970 bis 1980 kamen mehrere Mur-, Rutsch- und Hochwasserereignisse in Kärnten, Niederösterreich und Salzburg vor. Diese nahmen mehreren Menschen das Leben, zerstörten Straßen und Landstraßen. Zudem mussten tausende Menschen evakuiert werden und die Schäden waren in der Höhe von bis zu mehr als 20 Mio. Euro. (vgl. ebd.: 64f)
- Im Jahre 1995 löste ein schweres Gewitter mit Hagelschlag in Wartschenbach drei Murkatastrophen innerhalb von drei Tagen und zerstörte 30 Wohnhäuser. Nach diesen Ereignissen wurden in Österreich die ersten Warn- und Alarmsysteme in einem Wildbach installiert. Diese sollen etwa die Bevölkerung vor drohenden Ereignissen warnen. (vgl. ebd.: 68)
- Im Jahre 1999 ereigneten sich Rutschungen am Rindberg in Vorarlberg, die mehrere Monate dauerten. Die lange Regenperiode galt als Auslöser dieser großen Rutschungen. Insgesamt wurden eine Fläche von 1,4 km² und ein Gesteinsvolumen von 70 Mio. m³ erfasst. Zudem wurden 17 Gebäude, 65 ha Wald, 85 ha Almfläche und 5,7 km Straßen zerstört. Dieses Ereignis führte schlussendlich zur Einrichtung von dauerhaften Beobachtungsanlagen (Monitoring). (vgl. ebd.: 72f)

- Des Weiteren kam es in den Tiroler Orten Ried und Huben zu Steinschlägen und Felsstürzen. Diese wurden durch Niederschläge, Erdbeben und menschliche Aktivitäten ausgelöst und dauerten mehrere Wochen lang an. Insgesamt wurden 58 Häuser und 16 Betriebe bzw. 258 Personen evakuiert. Für die Sanierungs- und Sicherungskosten wurden rund 15 Mio. Euro ausgegeben. (vgl. ebd.: 74f)

8.1.3 Aktuelle Ereignisse

Im Jahre 2005 ereigneten sich in den Gemeinden Gasen und Haslau über mehrere Tage hinweg mehr als 780 Rutschungen und Hangmuren. Diese Ereignisse zeigten, dass Niederschläge mit geringer Intensität zu extremen Schäden führen können. Demnach wurden drei Wohngebäude zerstört und 22 beschädigt, Betriebsanlagen und Verkehrswege beschädigt oder zerstört, landwirtschaftliche Flächen und Wälder verwüstet und das gesamte Wirtschaftsleben beeinträchtigt. Zudem kamen zwei Menschen ums Leben und die Gesamtkosten betrugen 1,1 Mio. Euro. (vgl. ebd.: 78f)

Ein sehr aktuelles, extremes Murereignis fand nach einem intensiven Starkniederschlag mit Hagelschlag im Jahr 2019 im Einzugsgebiet Dawinbach im Stanzer Tal der Gemeinde Strengen am Arlberg statt. Dieses Gebiet war sowohl im Jahre 1945, als auch in den Jahren 1998 und 2016 von Murgängen betroffen. In diesem Ereignis wurden bis zu 30 m³ Gesteinsblöcke mittransportiert und rund 15.000 m³ Feststoffe abgelagert. Es entstanden Schäden an vier Gebäuden, an der Bundesstraßenbrücke und an der Längsverbauung. (vgl. BMLRT 2019: 82ff)

Zwischen dem 12. und 17. November 2019 kam es im Gasteinertal, Bezirk St. Johann in Salzburg zu insgesamt 125 Ereignissen in Folge von Starkniederschlägen. Der Großteil der Ereignisse ist auf Hangmuren, Rutschungen und Murgänge zurückzuführen. Die Ereignisse traten nach erhöhten Tagesniederschlagssummen auf. Im Jahre 2019 lösten sich über die Hälfte der Ereignisse im November nach einem Starkregen bzw. Gewitter aus. (vgl. ebd.: 115ff)

8.2 Schäden durch alpine Naturkatastrophen

Aufgrund der oben angeführten Ereignisse kann man ableiten, dass in Österreich eine Vielzahl an Sach- und Personenschäden durch extreme Felsstürze, Steinschläge, Muren und Rutschungen verursacht worden sind. Nichtsdestotrotz waren nur wenige Informationen über den verursachten Schadensausmaß bekannt, da in Österreich ein System zur umfassenden und einheitlichen Schadenserfassung gefehlt hat. Daher wurde im Rahmen eines Projekts des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald-, Naturgefahren und Landschaft (BFW) sowie der Universität für Bodenkultur (BOKU) prozess- und objektspezifische Vulnerabilitätsfaktoren entwickelt. Diese Methode hat ergeben, dass der Gesamtschadensausmaß für Wildbachereignisse im Untersuchungszeitraum von 1972-2004 ungefähr 965 Mio. Euro betragen. Außerdem hat die Auswertung ergeben, dass das Bundesland Salzburg den größten Anteil an direkten Sachschäden (21%), gefolgt von der Steiermark (18,2%), besaß. Zudem konnte die Anzahl an Personenschäden bzw. die Opferzahl auf bis zu 70 Personen pro Jahr festgelegt werden. (vgl. BMLRT 2021: o.S.)

9. Präventionsmaßnahmen bei gravitativen Massenbewegungen

Das folgende Kapitel bietet einen Überblick über die Präventionsmaßnahmen und dient somit einem besseren Verständnis bezüglich der Eindämmung von gravitativen Gefahren im Alpenraum. Der Fokus liegt dabei auf die derzeitigen Schutzmechanismen und Frühwarnsysteme, geht besonders auf die Herausforderungen und auf den Handlungsbedarf dieser ein. Außerdem widmet sie sich der Frage, inwieweit diese den Schutz der Gesellschaft sicherstellen und wie gut Österreich auf alpine Extremereignisse vorbereitet ist.

9.1 Derzeitige Schutzmaßnahmen

Unter Schutzmaßnahmen versteht man alle Vorkehrungen, die auf irgendeine Art und Weise zur Reduktion von Risiken beitragen (RUDOLF-MIKLAU 2018: 8). Laut Rudolf-Miklau werden Schutzmaßnahmen nach ihrem funktionalen und zeitlichen Bezug zur Katastrophe eingeteilt, nämlich in:

- Vorsorge (Schutz) vor der Katastrophe: reduziert die Schadenswirkung und stellt die Bevölkerung gut auf mögliche Gefahren ein.

- Bewältigung (Hilfe) während der Katastrophe: dient der Beseitigung der negativen Folgen (Schäden) einer Katastrophe und der Wiederherstellung des Normalzustandes. (RUDOLF-MIKLAU 2018: 8)

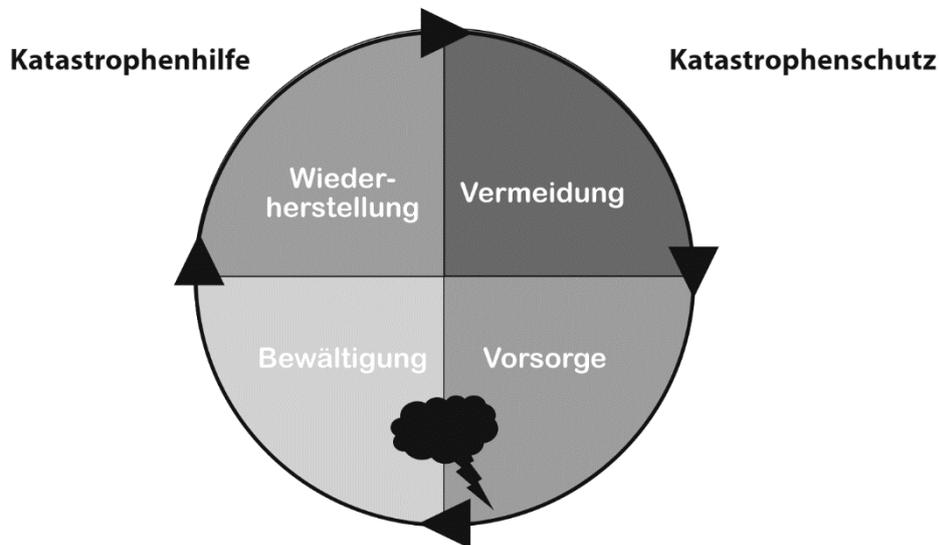


Abbildung 9: Kreislauf des Katastrophenmanagements nach ÖNORM (Quelle: RUDOLF-MIKLAU 2018: 8)

Eines der wichtigsten Instrumente in Bezug auf Anpassungsstrategien in Österreich ist der Gefahrenzonenplan. Diese stellt das zentrale Planungsinstrument für die Raumordnung und das Bau- und Sicherheitswesen in den Alpen dar. Ein weiteres Instrument, um künftig Katastrophen vorzubeugen, stellt das Frühwarnsystem (Monitoring) dar. Diese basiert auf einer laufenden Beobachtung der Veränderungen im Naturraum, wie z.B. Klima, Hydrologie, Geologie und Vegetation. Außerdem spielt die Anpassung des Verhaltens der Menschen bzw. die Verbesserung des Gefahrenbewusstseins eine wichtige Rolle, um das Risiko durch Naturgefahren in tolerierbaren Grenzen zu halten. Darüber hinaus ist es nennenswert, dass ein Schutz vor Naturgefahren und dessen möglichen Folgen nur dann nachhaltig bestehen kann, wenn man aus vergangenen Katastrophen und deren Folgen die entsprechenden Lehren für die Zukunft zieht. (vgl. BMLRT 2021: o.S.) Das Ziel dieses Kapitels ist es, Möglichkeiten einer Gefahrenerkennung und -abwehr vorzustellen.

9.1.1 Gefahrenzonenplan

Unter Gefahrenzonenplanung ist eine Darstellung und Bewertung von Naturgefahren gemäß geltender Rechtslage des Forstgesetzes 1975 zu verstehen. Sie dient als

Gutachten über die Gefährdungen und soll als Grundlage für das Bau- und Sicherheitswesen sowie die Raumplanung dienen. Dem Stand der Technik entsprechende Gefahrenzonenplan wird durch die Wildbach- und Lawinerverbauung im gesetzlichen Auftrag des Forstgesetzes zur Verfügung gestellt. Sie dient der Aktualisierung der bestehenden Gefahren und Risiken gemäß den Bestimmungen. Der Grad der Gefährdung wird in roten und gelben Gefahrenzonen dargestellt. Grundsätzlich besteht ein absolutes Bauverbot in roten Zonen, da diese derart gefährdet sind, sodass ihre ständige Benützung für Siedlungs- und Verkehrszwecke wegen der Schadenswirkungen bzw. der Häufigkeit der Gefährdung nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand möglich ist. Eine Ausnahme besteht nur bei Modernisierungen bestehender Gebäude. In gelben Zonen ist eine Bebauung nur unter Einhaltung von Auflagen, die im Rahmen eines Einzelgutachtens der zuständigen Gebietsbauleitung möglich ist, zulässig, da die ständige Nutzung dieser Gebiete das Risiko einer Gefährdung beinhalten. Darüber hinaus gibt es blaue Vorbehaltsbereiche und violette Hinweisbereiche. (vgl. BMLRT 2021: o.S.) Die Gefahrenzonenkarten geben keine Informationen über die Magnitude und Frequenz von Prozessen, erlauben jedoch eine flächenhafte Einschätzung des Gefährdungspotentials und der entsprechenden gesellschaftlichen Exponiertheit (vgl. MERGILI ET GLADE 2019: 39).



Abbildung 10: Ein Beispiel für eine Gefahrenzonenkarte. (Quelle: BMLRT 2021: o.S.)

Eine Gefahrenzonenkarte beinhaltet eine Gefährdungsmodellierung, die sich aus den folgenden Schritten zusammensetzt:

- Erstellung von Ereignisinventaren,
- Auskunft über die bisher aufgetretenen gravitativen Massenbewegungen,
- Erhebung von Geodaten, die die vergangenen Ereignisse erklären können,
- Durchführung der Gefährdungsmodellierung,
- Validierung der Modellierungsergebnisse und Klassifizierung der finalen Karte. (BELL ET AL. 2013: 54)

9.1.2 Monitoring

Unter Monitoring versteht man einen Überbegriff für alle Arten der unmittelbaren systematischen Erfassung (Protokollierung), Beobachtung oder Überwachung eines Vorganges oder Prozesses mittels technischer Hilfsmittel oder anderer Beobachtungssysteme (SCHMIDT ET AL. 2014: 107). Diese Beobachtung kann entweder für eine bestimmte Zeit oder dauerhaft erfolgen. Das Monitoring befolgt folgenden Zielen:

- Die Beobachtung zum besseren Verständnis der Vorgänge innerhalb des Systems, zur Gewinnung von Daten und zum Entwickeln, Testen und Kalibrieren von Modellen;
- Die Erfassung von Schwellenwerten, um in den ablaufenden Prozess eingreifen und Veränderungen im Prozessablauf bewirken zu können;
- Das Erkennen von Grenzwertüberschreitungen, um Aktionen auszulösen, die den Prozess an sich nicht verändern. (HÜBL ET MIKOS 2014: 51)

Das Beobachten folgt einer Wahrnehmungskette, die bestimmte Signale erfasst und diese verarbeitet. Dabei werden unterschiedliche Signale in verschiedenen Zeitintervallen aufgezeichnet. (vgl. ebd.: 51f) Wenn ein beobachteter Ablauf bzw. Prozess einen nicht gewünschten Verlauf einnimmt bzw. bestimmte Werte über- oder unterschreitet, arbeitet das Monitoring wie ein Warnsystem (vgl. SCHMIDT ET AL. 2014: 108). Die folgenden Fragen spielen für die Konzeption eines Monitoringsystems eine wichtige Rolle:

- Was will ich messen? (Messergebnis)
- Wie genau kann ich messen? (Messgenauigkeit)
- Wie häufig muss ich messen? (Messfrequenz). (ENGL ET KIEFFER 2014: 69)

Anschließend werden die erfassten Daten in ein Datenerfassungssystem übertragen, die dann zur Auslösung weiterer Schritte, wie eben genannt z.B. Warnungen, herangezogen werden (vgl. HÜBL ET MIKOS 2014: 62). Die Datengrundlage bildet demnach die Basis für die Risikoanalyse (vgl. GLADE ET MIKLAU 2015: 17). Die folgende Abbildung soll eine Datenaufzeichnung veranschaulichen:

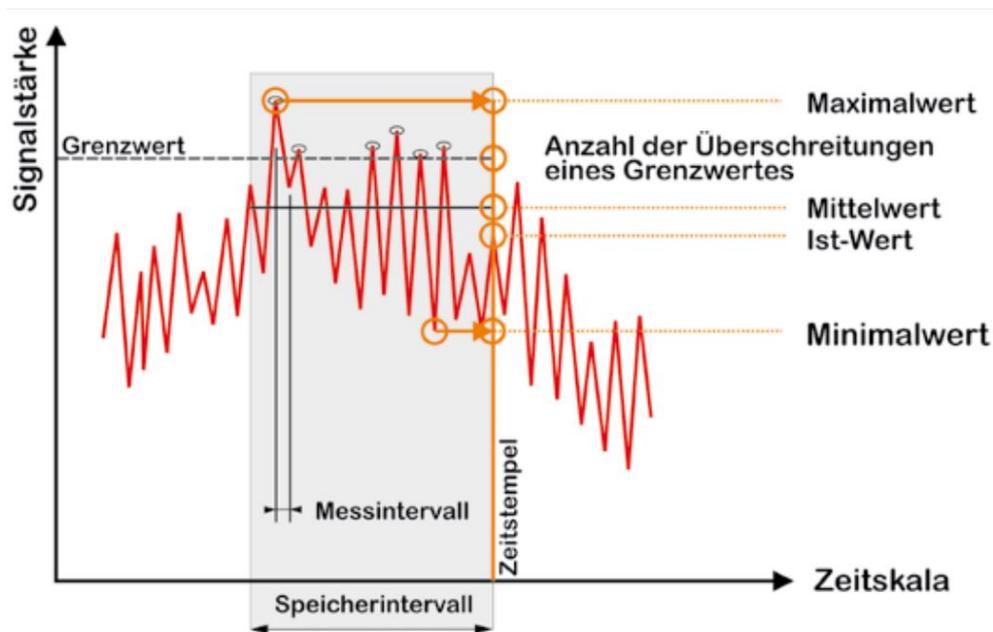


Abbildung 11: Datenaufzeichnung (Monitoring). (Quelle: HÜBL ET MIKOS 2014: 63)

Außerdem werden die Daten für ein dauerhaftes Monitoring in einer Datenbank archiviert. Aufgrund der hohen Kosten solcher Systeme, ist das wichtigste Kriterium zur Auswahl dieser Gebiete die Häufigkeit der Ereignisse. (vgl. HÜBL ET MIKOS 2014: 64f) Der aktuellste Zustandsbericht über Frühwarn- und Monitoringsysteme in Österreich ist eine wichtige Informationsquelle in Bezug auf das Thema. Die folgende Abbildung gibt einen kurzen Überblick über die unterschiedlichen Monitoringsysteme in Österreich:

MONITORING TECHNIKEN

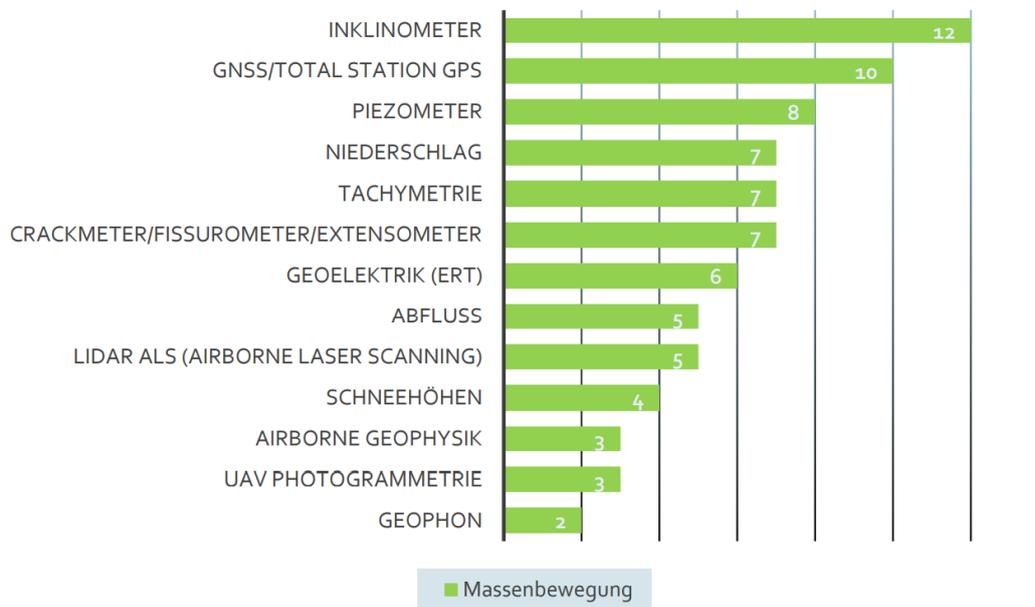


Abbildung 12: Auflistung der Methoden, die zum Monitoring von Massenbewegungen zum Einsatz kommen. (Quelle: BMLRT 2019: 13)

Monitoringsysteme setzen eine genaue geomorphologisch-geologische Kartierung des Gefahrenbereichs voraus und leisten einen wichtigen Beitrag bei der Neuauswertung von Bauland. (vgl. GLADE ET MIKLAU 2015: 17)

9.1.3 Frühwarnsysteme

Frühwarnsysteme basieren auf Monitoringsysteme und liefern Datensätze, die zu sammeln und zu analysieren sind. Sobald ein gewisser Stellenwert erreicht wird, werden Alarmsignale entsendet und ein automatisierter Evakuierungsplan erstellt. (vgl. BRAUNER ET AL. 2015: 243) Frühwarnsysteme richten sich danach, jene Verkehrswege zu schützen, die durch Gebiete mit einer Wahrscheinlichkeit potentiell auftretenden Ereignissen konfrontiert sind und keine Schutzverbauungen verfügen (vgl. GLADE ET MIKLAU 2015: 17).

Eine weitere Aufgabe eines Frühwarnsystems ist u.a. eine Verkehrssperre, um Menschen oder eine Evakuierung zu schützen. Jedoch kann es vorkommen, dass Frühwarnsysteme Fehlalarme auslösen und somit zu technischen Problemen führen. Die Fehleranfälligkeit von elektronischen Bestandteilen der Anlage sowie die Wartung des Systems in schwer erreichbaren Zonen sind zudem mit sehr hohen Kosten verbunden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Frühwarnsysteme nicht unbedingt kostengünstig sind und deshalb nur in besonders kritischen

Ausnahmesituationen zum Einsatz kommen. Daher sollten Verbesserungsmaßnahmen wie etwa die Integrierung von Sensornetzwerken vorgenommen werden. Diese ermöglichen eine frühere Erkennung gravitativer Massenbewegungen, da sie in der Lage sind, Echtzeitbeobachtungen durchzuführen bzw. Detektoren zu kombinieren. (vgl. BRAUNER ET AL. 2015: 243)

9.1.4 Aktuelle Projekte

Im Umsetzungszeitraum 2022 bis 2041 soll ein Schutzprojekt im Kapuzinerberg, Salzburg durch den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung durchgeführt werden. Der Anlass des Projektes ist die Gefährdung des Siedlungs- und Wirtschaftsraumes, der Infrastruktureinrichtungen und Verkehrsanlagen, da bislang Steinschläge, abstürzende Bäume und mehrere Hangmuren aufgrund der Starkniederschläge zu Stande gekommen sind. Ab 2022 soll die Errichtung der Steinschlag- und Murschutznetze umgesetzt werden. Anschließend werden die nächsten 20 Jahre für Sanierung und Bewirtschaftung der Steinschlag- und Schutzwälder angelegt. Der Planungsgedanke umfasst die Errichtung von Schutzmaßnahmen und somit den Ersatz der nicht dem Stand der Technik entsprechenden Bestandsbauten. Die Gesamtkosten betragen 3.000.000 Euro. (vgl. BMLRT 2021: o.S.)

Ein weiteres, laufendes Projekt ist das Projekt Gallenzerkogelmure in der Gemeinde Hollenstein an der Ybbs. Im Jahre 2014 ereignete sich nach einem zweitägigen Niederschlagsereignis und der Vorbefeuchtung aus einer Rutschung eine Mure. Aufgrund weiterer Instabilitäten im Anrissbereich und die Wahrscheinlichkeit einer Wiederholung bei Starkniederschlägen wurde das Projekt bereits 2020 begonnen und wird 2022 enden. Dadurch werden 8 Einfamilienhäuser, 7 Mehrfamilienhäuser, 15 Nebengebäude, zwei landwirtschaftliche Anwesen, zwei Betriebe, ein Gasthaus, eine Schule, zahlreiche Brücken, Parkplätze und Gemeindestraßen, sowie die Landesstraße geschützt. Hierfür wird ein Murbecher am Ende des Geschiebeablagerungsbeckens, eine Filtersperre mit Überlaufmulde inkl. Frühwarnsystem und ein Unterlauf zwischen Filtersperre und bestehendem Landesstraßendurchlass errichtet. Die Gesamtkosten für das Projekt betragen 2.450.000 Euro. Bevor die Gemeinden den Antrag auf das Projekt stellen, muss die Gefahrenzonenplanung vom Bundesministerium (BMLRT) genehmigt werden.

Aktuelle Schutzprojekte sind auf der Homepage des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus zu entnehmen. (vgl. BMLRT 2021: o.S).

9.2 Förderungsmanagement

Unter Förderungsmanagement versteht man alle Maßnahmen zur Finanzierung der Schutzmaßnahmen im öffentlichen Gesetz. Diese werden durch die Wildbach- und Lawinenverbauung abgewickelt, welche für einen optimalen Einsatz der vorhandenen Förderungsmittel sorgen. Dazu zählen Gefahren durch Wildbäche, Hochwasser, Lawinen, Muren, Steinschlag, Rutschungen und Felssturz. Hierfür stellt der Bund für die Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung jedes Jahr Mittel in der Höhe von 69 Mio. Euro zur Verfügung, welche für die Planung und Umsetzung von Schutzprojekten, Sanierungen oder Erhaltung von Schutzanlagen verwendet werden. Für das Erhalten von Fördermittel muss die Gemeinde in erster Linie mit einem genehmigten Gefahrenzonenplan eine Beantragung durchführen. Sofern das Schutzprojekt förderungswürdig anerkannt worden ist, kann die Planung durch die zuständige Wildbach- und Lawinenverbauung in Angriff genommen werden. Letztendlich erfolgt eine Genehmigung durch das Bundesministerium und die Zustimmung aller Finanzierungspartner. (vgl. BMLRT 2021: o.S.) Außerdem werden für die Verwendung von Bundesmitteln die Grundsätze der Wirtschaftlichkeit, Sparsamkeit und Zweckmäßigkeit gemäß §2 Bundeshaushaltsgesetz angewendet. Hierfür sind Kosten-Nutzen-Untersuchungen zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit bei Projekten mit großem finanziellen Umfang durchzuführen. Für das Projekt ist demnach sowohl der Aufwand, d.h. die Kosten als auch der Ertrag, d.h. der Nutzen in Geldeinheit zu erfassen. (vgl. BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND UND FORSTWIRTSCHAFT 2006: 4). Die Kriterien einer Priorität sind u.a. der dringende Schutzbedarf von Menschen, Dauersiedlungsräumen, Sachgütern sowie die Wirtschaftlichkeit, die Erhöhung des Gefährdungspotentials, Ereigniswahrscheinlichkeit und sonstige öffentliche Interessen (vgl. ebd.: 48): Ebenso werden indirekte Werte, wie z.B. der Verlust der Geschäftszeiten, oder immaterielle Werte, wie z.B. Kulturgüter oder das Sicherheitsgefühl der Bevölkerung mit qualitativen Faktoren bewertet (vgl. PICHLER ET SCHWENDTNER 2013: 132).

9.3 Risikomanagement

Unter Risikomanagement versteht man die Steuerung und Überwachung des Umgangs mit Naturkatastrophen. Es beinhaltet die Prozesse der Identifikation, Analyse, Bewertung und Behandlung von Risiken und gibt Informationen über die Gebrauchstauglichkeit und Lebensdauer des Systems (Bauwerks), sowie über Systemstörungen oder –ausfälle. (vgl. RUDOLF-MIKLAU ET RIMBÖCK 2016: 883)

Das Konzept hat sich international zum wichtigsten Konzept der Vorsorge und Bewältigung von Naturkatastrophen entwickelt, da es die wichtigen Risikofaktoren beobachtet und die Risiken periodisch zu erfasst. Anschließend werden die Risiken bezüglich ihrer Akzeptabilität bewertet und darauf basierend der notwendige Handlungsbedarf und die Prioritäten festgestellt, womit die Entwicklung mit geeigneten Maßnahmen gesteuert wird. Diese Maßnahmen ermöglichen eine Vermeidung, aber auch eine Verminderung neuer inakzeptabler Risiken, sowie deren Umgang. (vgl. RUDOLF-MIKLAU 2018: 19f)

Die maßgeblichen Optionen des Risikomanagements sind u.a. die Inventarstellung der gravitativen Massenbewegungen, das Monitoring mit Integration in Frühwarnsystemen und die zeitlich-räumlichen Visualisierungen der gravitativen Massenbewegungen in unterschiedliche Bearbeitungstiefen. (vgl. GLADE ET MIKLAU 2015: 14)

Der Schwerpunkt des Risikomanagements sind die sogenannten Schutzziele. Damit ist das Niveau an Sicherheit, das bestimmte VerantwortungsträgerInnen in ihrem Verantwortungsbereich anstreben, gemeint. In der Praxis dient es auch als Überprüfungs-kriterium des Handlungsbedarfs für die Erreichung der angestrebten Sicherheit. (vgl. PLANAT 2013: 4)

Schutzziele werden mithilfe von Wahrscheinlichkeiten von Wiederkehrperioden berechnet, häufiger risiko-orientiert entwickelt und durch das Ausmaß möglicher Schäden bestimmt (vgl. SCHNEIDERBAUER ET AL. 2018: 535).

Je nach Region sollten klar festgelegte Schutzziele herangezogen werden, die auf Empfehlungen und Erfahrungswerten basieren (vgl. ebd.: 543). Eine Differenzierung der Schutzziele ist im Hinblick auf die unterschiedlichen Nutzenkategorien und den Wert der Schutzgüter sinnvoll (vgl. RUDOLF-MIKLAU ET RIMBÖCK 2016: 880).

Die drei wichtigsten Grundfragen im Konzept des Risikomanagements lauten:

- Was kann passieren? Alle Naturgefahren und ihre Auswirkungen auf den Lebensraum werden untersucht.

- Was darf passieren? Alle negativen Auswirkungen dieser Risiken werden untersucht und bewertet sowie eine Grundlage für Schutzleistungen, d.h. welche Risiken akzeptabel und welche Sicherheit angestrebt wird, festgelegt.
- Was ist zu tun? Maßnahmen mit höchster Schutzwirkung werden ausgewählt und umgesetzt sowie das verbleibende Restrisiko untersucht. (vgl. RUDOLF-MIKLAU 2018: 65)

9.4 Risikoanalyse

Eine Risikoanalyse stellt die Grundlage für eine gezielte Vorbereitung auf zukünftige Katastrophen dar (RUDOLF-MIKLAU 2018: 6). Somit verkettet die Risikoanalyse Wahrscheinlichkeiten hinsichtlich Magnitude und Frequenz einer Naturgefahr, der Reichweite des Prozesses, der räumlichen und zeitlichen Trefferwahrscheinlichkeit, der Vulnerabilität der exponierten Personen und Objekte sowie die Kosten im Falle eines Sachschadens miteinander. Aus der Risikoanalyse resultiert somit der jährliche Verlust von Objekten und Personen infolge eines Naturereignisses bzw. der damit verbundene volkswirtschaftliche Schäden. (ENGL 2016: 83)

9.4.1 Restrisiko

Bezugnehmend auf die Fragestellung, inwiefern die derzeitigen Schutzmaßnahmen einen 100%igen Schutz anbieten, wird man darauf hingewiesen, dass es keinen 100%igen Schutz geben kann und daher immer ein Restrisiko verbleibt (vgl. RUDOLF-MIKLAU 2018: 30). Die Auswirkungen eines Restrisikos kommen sehr selten vor, müssen aber im Falle in Kauf genommen werden. Somit gibt es keinen absoluten Schutz vor Naturgefahren bzw. keine vollkommene Sicherheit für Personen und Infrastruktur, da immer ein gewisses Restrisiko bestehen bleibt. (vgl. SCHNEIDERBAUER ET AL. 2018: 328) Das wichtigste Ziel ist, das verbleibende Restrisiko auf ein akzeptables Maß zu reduzieren (vgl. PREH ET AL. 2019: 436). Hierfür wäre eine Ermittlung des nach Realisierung der Maßnahmen bestehenden Restrisikos durchzuführen, welche aber in Österreich nur in Ausnahmefällen gegeben ist (vgl. ebd.: 454). Das Restrisiko strebt nach Überlegungen, welche Bauwerke besonders gefährdet sind und von welchen Bauwerken besondere Gefahr ausgehen könnte. Hierfür dienen Untersuchungen historischer Erdbeben sowie geologische Aufnahmen. (vgl. LENHARDT ET AL. 2019: 600) Für die Zukunft wäre

es sicherlich von Vorteil, wenn bauliche Schutzsysteme in regelmäßigen Abständen gewartet und weiterentwickelt werden würden (vgl. SCHNEIDERBAUER ET AL. 2018: 36).

9.5 Schadensprävention

Eine verantwortungsvolle Politik benötigt qualitativ hochwertige Entscheidungsgrundlagen als Schlüssel für die Schadensprävention von Naturkatastrophen. Ein solcher Schlüssel wäre die Kenntnis der „Verletzlichkeit“ von Personen und Objekten gegenüber alpinen Naturgefahren und die „Resilienz“. (vgl. PICHLER ET SCHWENDTNER 2013: 132)

9.5.1 Vulnerabilität und Resilienz

Unter Vulnerabilität bzw. Verletzlichkeit wird die Empfindlichkeit eines gefährdeten Objekts gegenüber der entsprechenden Naturgefahr, gemessen auf einer Skala von 0 (unempfindlich) bis 1 (höchst vulnerabel), charakterisiert (DIKAU ET GLADE 2001: 43). Sie hängt von der Angriffsfläche und der Widerstandskraft, die ein Objekt oder eine Person bietet, ab (vgl. RUDOLF-MIKLAU 2018: 18). Demnach verwenden verschiedene Vulnerabilitätsanalysen unterschiedliche Aspekte und Parameter, um Vulnerabilität zu messen. Bei einer physischen bzw. technischen Vulnerabilitätsanalyse von Infrastruktur und Wohngebäuden geht es um die baustatischen Eigenschaften und Exposition eines Gebäudes, während in der Klimaforschung auf eine anfällige Region und dessen Häufung anfälliger gesellschaftlicher Gruppe, Landnutzungsformen oder Wirtschaftsbereiche eingegangen wird. (vgl. BIRKMANN 2008: 7) Birkmann unterscheidet vier Dimensionen der Vulnerabilität:

- Soziale Dimension: Vulnerabilität unterschiedlicher Bevölkerungsgruppen, Bewältigungskapazitäten und Anpassungspotentiale
- Ökonomische Dimension: Vulnerabilität unterschiedlicher ökonomischer Sektoren und Betriebsstandorte
- Umweltdimension: Vulnerabilität von Umweltfunktionen des Raumes z.B. Trinkwassergewinnung
- Institutionelle Dimension: Effektivität von Planung und Katastrophenvorsorge (ebd.: 16)

Darüber hinaus wird das Konzept der Resilienz folgendermaßen beschrieben:

„[...] die Fähigkeit der Gesellschaft, Einwirkungen zu absorbieren und in weiterer Folge durch ökonomische und soziale Ressourcen Bewältigungsstrategien zu entwickeln, um zukünftige negative Konsequenzen abzuwenden und sich zu regenerieren“. (FUCHS ET KEILER 2016: 50)

Unter Resilienz wird demnach eine Widerstandsfähigkeit verstanden, welche auch unter Einfluss von externen Störungen, zentrale Funktionen des Systems aufrechterhalten kann (vgl. BIRKMANN 2008: 10). Es bestehen zwar Unklarheiten bezüglich des Zusammenhangs der beiden Konzepte, da diese sowohl als miteinander verbundene als auch konkurrierende Konzepte verstanden werden können. Die folgende Abbildung veranschaulicht die Relation von Vulnerabilität und Resilienz.

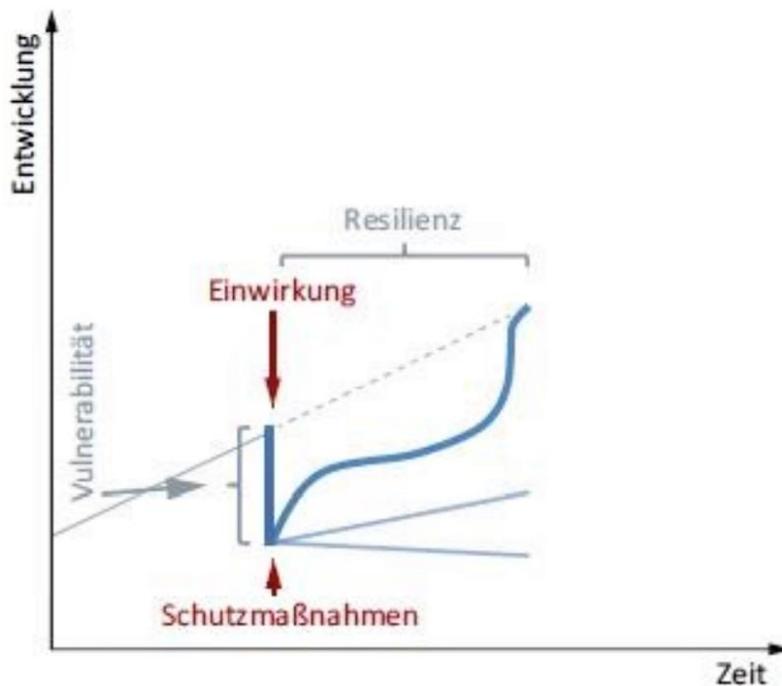


Abbildung 13: Relation von Vulnerabilität und Resilienz (Quelle: FUCHS ET KEILER 2016: 51)

Anhand der Abbildung ist ersichtlich, dass das Modell auf einer Annahme aufbaut, in der sich eine Gesellschaft über einen Zeitraum weiterentwickelt und ihr Wohlstandsniveau erhöht. Je geringer die Resilienz der Gesellschaft ist, desto langsamer verläuft der Prozess der Regenerierung eines Wohlstandes. , .(vgl. FUCHS ET KEILER 2016: 51)

Um eine sinnvolle Schadensprävention gewährleisten zu können, sollten folgende Maßnahmen berücksichtigt werden:

- Neue Gebäude nur außerhalb der Gefahrenzonen errichten,
- Raumaufteilung entsprechend planen,
- Ufer und Böschungen pflegen,
- Außenwände stärken,
- Innenräume anpassen,
- Sehr steile Hänge abflachen,
- Vernässte Bereiche entwässern,
- Rutschkörper stabilisieren,
- Versorgungsleitungen nicht an kritischen Stellen verlegen,
- Bauen am unmittelbaren Hangfuß vermeiden. (vgl. BMLFUW 2015: 23fff)

9.6. Herausforderung und Handlungsbedarf

Bezüglich Schutzmaßnahmen gibt es eine Reihe von Handlungsbedarf, die in diesem Unterkapitel kurz erläutert werden.

1.) Neben Anpassungsmaßnahmen wie Frühwarnsysteme und Monitoring besteht ein großer Bedarf an individuellen Verhaltensänderungen. Diese umfasst u.a. die Umsiedlung von Menschen aus Risikogebieten und zusätzliche Anpassungsprozesse wie die Veränderung der Lebensgrundlagen, der Mobilität und das Leben mit den Folgen von Änderungen des Lebensraumes. (vgl. BIRKMANN 2011: 818f)

2.) Rudolf-Miklau sieht die Zunahme der Verletzlichkeit der Gesellschaft für Naturkatastrophen als Problem. Die Verletzlichkeit der Gesellschaft wird dem globalen Wandel bzw. dem gesellschaftlichen Wandel sowie dem Klimawandel zugeschrieben. Die fehlende Eigenverantwortung der Menschen und die Zunahme des gesellschaftlichen Unvermögens zur Selbsthilfe haben die Katastrophenprävention und -bewältigung zu öffentlichen Aufgaben entwickelt. Diese stellen natürlich umfangreiche Herausforderungen für Gemeinden dar. (vgl. RUDOLF-MIKLAU 2018: 4)

3.) Nach Rudolf-Miklau erwecken die umfangreichen öffentlichen Schutzleistungen in der Bevölkerung eine hohe Erwartungshaltung, sodass diese staatlich gewährleistete Sicherheit die Bereitschaft und Fähigkeit der Gesellschaft, selbst für seinen Schutz und die individuelle Sicherheit vorzusorgen, enorm verlangsamt. Es gibt zwar keine klaren Regeln für eine Grenzziehung zwischen staatlicher Schutzaufgaben und der Eigenversorge, dennoch stellt sich die Frage, wo diese Grenze tatsächlich liegt. (vgl. ebd.: 11) Laut Glade sind die Menschen durch die hohe Bevölkerungsdichte und die teuren Infrastrukturen sehr vulnerabel geworden, welches zu einem Vulnerabilitätsparadoxon führt. Er meint, dass je besser die Systeme optimiert werden, umso empfindlicher man gegenüber kurzen Störungen wird. (vgl. GLADE 2019: 2)

4.) Eine weitere Herausforderung stellt die staatliche Schutzpflicht für den Umgang mit Naturkatastrophen dar, da der rechtlich, explizit verankerte Anspruch auf Schutzleistungen in Österreich relativ gering ist. Diese Schutzleistungen sind zwar öffentliche Güter, d.h. sie dürfen kostenlos konsumiert werden, dennoch ist es dem Staat überlassen, in welchem Ausmaß öffentliche Schutzleistungen bereitgestellt werden. Zudem ist der Nutzen von öffentlichen Schutzmaßnahmen nicht immer ausgewogen und gerecht verteilt. Eine Schutzmaßnahme ist demnach dann gerecht, wenn eine Mehrheit von Personen davon profitieren kann und die Allgemeinheit vom Schutz nicht ausgeschlossen ist. (vgl. RUDOLF-MIKLAU 2018: 13)

5.) Darüber hinaus kann man feststellen, dass das Naturgefahrenmanagement in Zeiten knapper öffentlicher Ressourcen den strengen Auflagen der Budgetierung obliegt. Somit stellt sich bei der Planung und Durchführung von Schutzmaßnahmen die Frage, inwieweit die Bewertung von personenbezogenen Schäden eine zentrale Rolle spielt. Die Bewertung von Personenschäden bei der Planung und Durchführung von Schutzmaßnahmen wirft die Frage nach der Bewertbarkeit von Menschenleben auf. (vgl. BORDAT 2013: 146)

6.) Des Weiteren sind die steigenden Bevölkerungsanzahlen der Bevölkerungsdruck, sowie die dadurch ausgelöste Bodenknappheit eine besondere Herausforderung im Umgang mit Naturgefahren. Gemeinden werden dadurch dazu gezwungen, Baugrundstücke in Hanglagen auszuweisen, welche bisher für Siedlungszwecke als

ungeeignet galten. Somit entstehen immer mehr Häuser, die sich in gefährdeten Gebieten befinden und daher eventuell Rutschungen und Steinschlägen ausgesetzt sind. Oftmals wirbt die Immobilienbranche mit der harmonischen Aussicht des Hauses, dessen Gefahr für Laien in der Regel nicht unmittelbar erkennbar ist. (vgl. ENGL 2016: 78) Um eine Neuansiedlung zu ermöglichen, spielen Umsiedlungsprogramme und die Entwicklung neuer Wohngebiete eine entscheidende Rolle und eine große Herausforderung. Außerdem besteht die Notwendigkeit einer strukturierten Planung und Management von Umsiedlungsprogrammen. (vgl. BIRKMANN 2011: 828f)

7.) Darüber hinaus stellt die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. eine Wiederholungswahrscheinlichkeit eine große Herausforderung dar, da Massenbewegungen regional und nicht immer im selben Ausmaß auftreten. Diese Herausforderung bedarf ebenso einer Handlung. (vgl. ENGL 2016: 79)

8.) Es stellt sich ebenso die Frage, welche Risiken im Konzept des Risikomanagements akzeptabel sind und wer über die Akzeptabilität entscheidet. Außerdem ist es wichtig, wer die bestehenden Risiken zu tragen hat. (vgl. RUDOLF-MIKLAU 2018: 24)

Betrachtet man das Risikomanagement in Österreich in Bezug auf den Klimawandel, so kann man Unsicherheiten, aber auch Handlungsbedarf erkennen. Es wird versucht, mögliche Ergebnisse aus einer Vielzahl von Klimaszenarien zu ermitteln, um einen Entscheidungsplan zu entwickeln. (vgl. XIAO-CHEN ET AL. 2017: 13)

10. Diskussion

In diesem Kapitel werden die formulierten Hypothesen und Forschungsfragen beantwortet und diskutiert.

Die erste Hypothese lautete wie folgt:

Die Auswirkungen des Klimawandels und die veränderten klimatischen Bedingungen begünstigen das Auftreten von Extremereignissen.

- Wie wirkt sich der Klimawandel auf den Alpenraum aus?

- Begünstigen die veränderten klimatischen Bedingungen das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen und Extremereignissen?

Es ist unumstritten, dass die Auswirkungen des Klimawandels und die veränderten klimatischen Bedingungen das Auftreten von Extremereignissen begünstigen. Die steigenden Lufttemperaturen, die Landnutzungsänderungen, sowie die Veränderung der Niederschläge und der Gletscherbedeckung und des Permafrosts sind Hauptursachen für das Auftreten von gravitativen Extremereignissen. Jedoch darf man die Ursachen von Extremereignissen nicht nur auf den Klimawandel reduzieren. Es lässt sich somit feststellen, dass der Klimawandel im Zusammenhang mit unterschiedlichen auslösenden Faktoren das Auftreten begünstigt. Da keine zuverlässige Prognose für den Alpenraum verfügbar ist, gibt es auch keine exakte Vorhersage über die Auswirkung des Klimawandels auf Extremereignisse. Jedoch kann man aufgrund vorliegenden Klimaszenarien ableiten, dass das Auftreten von Extremereignissen in den nächsten Jahren zunehmen wird und der Klimawandel dabei immer eine wichtigere Position einnimmt, sofern man nichts dagegen tut. Es ist auf jeden Fall zu berücksichtigen, dass eine klare Trennung zwischen den von Menschen beeinflussten Faktoren und dem Klimawandel sehr schwierig ist und somit eine große Herausforderung darstellt.

Die zweite Hypothese lautete wie folgt:

Präventionsmechanismen und Frühwarnsysteme bieten nicht ausreichend Schutz für die Gesellschaft.

- Welche Präventionsmaßnahmen und Frühwarnsysteme gibt es für den österreichischen Alpenraum?
- Bieten Präventionsmechanismen und Frühwarnsysteme ausreichend Schutz vor Extremereignissen für die Gesellschaft?
- Besteht ein Handlungsbedarf und wo gibt es Lücken?
- Wie gut ist Österreich auf alpine Extremereignisse vorbereitet?

Die derzeitigen Präventionsmaßnahmen in Österreich sind der Gefahrenzonenplan und die Frühwarn- und Monitoringsysteme. Der Gefahrenzonenplan zeigt rote Zonen, in denen ein absolutes Bauverbot besteht. Diese Karten geben jedoch keine

Informationen über die Magnitude und Frequenz von Prozessen. Sie ermöglichen nur eine flächenhafte Einschätzung des Gefährdungspotentials. Die Monitoringsysteme führen eine Beobachtung durch und erfassen bestimmte Signale. Wenn ein Prozess einen bestimmten Wert über- oder unterschreitet, wird eine Warnung ausgesendet. In Österreich gibt es unterschiedliche Methoden zum Monitoring von extremen gravitativen Massenbewegungen. Diese umfassen das Inklinometer, das GNSS, das Piezometer, den Niederschlag, die Tachymetrie, den Crackmeter, die Geoelektrik, den Abfluss, das Lidar, die Schneehöhen, die airborne Geophysik, die UAV Photogrammetrie und das Geophon. Im Zuge dieser Arbeit wurden diese Methoden nicht ins Detail beschrieben, da es nur darum geht, ob diese einen ausreichenden Schutz bieten. Das Problem besteht darin, dass Monitoringsysteme nicht überall eingesetzt werden, da diese nicht kostengünstig sind. Daher kommen Monitoring- und Frühwarnsysteme nur in besonders kritischen Ausnahmesituationen zum Einsatz. Außerdem besteht eine Fehleranfälligkeit von elektronischen Bestandteilen der Anlage sowie die Wartung des Systems in schwer erreichbaren Zonen, welche wiederum mit sehr hohen Kosten verbunden ist. Es wäre daher von Vorteil, wenn Verbesserungsmaßnahmen wie etwa die Integration von Sensornetzwerken vorgenommen werden, weil diese eine frühere Erkennung gravitativer Massenbewegungen ermöglichen, da sie in der Lage sind, Echtzeitbeobachtungen durchzuführen bzw. Detektoren zu kombinieren. Der beste Schutz bezüglich extremen gravitativen Massenbewegungen ist demnach die Vermeidung von gefährdeten Gebieten.

„Einen absoluten Schutz vor Naturgefahren gibt es nicht“. (BMLFUW 2015: 5)

Auch mit Optimierungsmaßnahmen und neuesten Technologien gibt es niemals einen 100%igen Schutz gegen extremen gravitativen Massenbewegungen, da man immer mit einem Restrisiko und einem Überlastfall rechnen muss. Diese kommen zwar selten vor, müssen aber im Falle in Kauf genommen werden. Aufgrund dessen ist es sehr wichtig, das verbleibende Restrisiko auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Somit kann man feststellen, dass der Schutz gegen extremen gravitativen Massenbewegungen nur eingeschränkt möglich ist. Für die Zukunft wäre es sicherlich von Vorteil, wenn bauliche Schutzsysteme in regelmäßigen Abständen gewartet und weiterentwickelt werden würden. Für die bessere Vorbereitung auf

Extremereignisse sollte man demnach das Bewusstsein für ein mögliches Auftreten extremer Ereignisse stärken und die Gesellschaft über Extremereignisse aufklären bzw. gemeinsam agieren. Dieser Mangel an Aufmerksamkeit in der allgemeinen Öffentlichkeit stellt eine große Herausforderung dar. Es sollte zuerst geforscht werden, welche Risiken von der Gesellschaft akzeptiert werden, um entsprechende Schutzmaßnahmen zu treffen.

11. Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit beginnt mit einer Darlegung der theoretischen Grundlagen vor, da die Bandbreite von gravitativen Massenbewegungen sehr vielfältig gefächert ist. Daher war es wichtig, die unterschiedlichen Prozesstypen zu beschreiben und das anerkannte Klassifikationsschema von Varnes zu repräsentieren. Somit ist klargestellt, dass die Verlagerungsprozesse der gravitativen Massenbewegungen in das Fallen, Kippen, Gleiten, Rutschen, Driften, Fließen und die kombinierte komplexe Bewegung eingeteilt ist. Da die Intensität und das Ausmaß gravitativer Massenbewegungen von großer Relevanz sind, wurde das Aktivitätsstatus von Cruden und Varnes mit acht unterschiedlichen Aktivitätszuständen präsentiert und beschrieben. Diese lassen sich in drei Hauptklassen, nämlich in „aktiv“ „momentan aktiv“ und „dauerhaft inaktiv“ gliedern. Da aber die Geschwindigkeit aktiver gravitativer Massenbewegungen sehr unterschiedlich ist und eine äußerst große Spannbreite der zugrunde liegenden Prozesse aufweist, wurden unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen und deren Schadensausmaß veranschaulicht.

In Folge dessen wurden die Ursachen für das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen aufgegriffen, um klarzustellen, wie gravitative Massenbewegungen überhaupt entstehen. Diese werden in vorbereitende, prozessauslösende und kontrollierende Faktoren einteilen. Darüber hinaus werden weitere destabilisierende Faktoren aufgegriffen, die für die Instabilität eines Hanges verantwortlich sind. Diese werden in endogene und exogene Faktoren, sowie in anthropogene Ursachen unterteilt. Dabei lässt sich feststellen, dass Starkniederschläge, Änderung von Permafrostbedingungen, Eis- und Schneeschmelze, sowie Vulkanausbrüche und Erdbeben wichtige Ursachen für das Auftreten gravitativer Massenbewegungen sind. Der ausschlaggebende Faktor für diese Arbeit ist jedoch der Einfluss des Klimawandels, welche im engen

Zusammenhang mit gravitativen Phänomenen steht, die im siebten Kapitel detailliert erläutert werden. Anschließend werden im nächsten Kapitel die Auswirkungen gravitativer Massenbewegungen auf den Menschen, auf Sach- und Gebäudeschäden sowie auf die Beeinträchtigung von kritischen Infrastrukturen im Alpenraum eingegangen. Diese zeigen, dass der Anstieg der Extremereignisse enorme Schäden verursachen kann, die mit sehr hoher finanzieller Beeinträchtigung einhergehen. Daraufhin wird ein Überblick über gravitative Massenbewegungen, die im Alpenraum vorkommen, verschafft. Einzelne Phänomene wie Sturzereignisse, Rutschungen und Muren werden im Detail beschrieben. Dabei lässt sich feststellen, dass Sturzereignisse wie Bergsturz, Felssturz und Steinschlag den zentralen Prozess einer komplexen Massenbewegung darstellen. Außerdem bestehen unterschiedliche Rutschungstypen, die sich in Translations- und Rotationsrutschung, sowie in komplexe und kombinierte Rutschung einteilen lässt. Diesbezüglich unterscheidet man zwei unterschiedliche Rutschungsarten, nämlich permanente Rutschungen, die sich über einen längeren Zeitraum bewegen und spontane Rutschungen, die sich plötzlich und schnell bewegen. Außerdem wird ersichtlich, dass Murgänge einen besonderen Platz hinsichtlich Klassifizierung gravitativer Massenbewegungen einnehmen, da man anhand Dokumentationen eine deutliche Zunahme des Auftretens erkennen kann.

Das siebte Kapitel beschäftigt sich mit Klimaänderung im Allgemeinen. Laut Berichte des IPCC kann man sehr wahrscheinlich zwischen 2030 und 2052 mit einem Temperaturanstieg von $1,5^{\circ}\text{C}$ rechnen. Diese größten Ursachen hierfür sind die anthropogen verursachten Treibhausemissionen und Landnutzungsänderungen, sowie Verbrennung fossiler Brennstoffe. Betrachtet man den Einfluss des Klimawandels auf Extremereignisse im Alpenraum, so kann man deutlich feststellen, dass die österreichischen Alpen sehr stark davon betroffen sind. Die relevantesten Klimaänderungen, die einen Einfluss haben, sind u.a. die Veränderung der Niederschläge, die steigende Temperatur, die Veränderung der Gletscherbedeckung und des Permafrosts. Diese Faktoren sind im Zusammenhang mit vermehrten extremen Hitzeereignissen für das Verschwinden der alpinen Gletscher und den Permafrostrückgang verantwortlich. Der ausschlaggebende Faktor ist jedoch die Zunahme von sowohl langanhaltenden Niederschlagsereignissen mit geringer Intensität, als auch kurz anhaltende Regenstürme, die durch den Klimawandel begünstigt und eines der Hauptursachen von Extremereignissen sind. Dabei lässt

sich feststellen, dass zwar Vermutungen eines direkten Zusammenhangs zwischen den Klimawandelfaktoren und der Reaktivierung von gravitativen Massenbewegungen bestehen, jedoch die Ursachen nicht nur auf den Klimawandel reduziert werden können. Sie sind nur ein Indiz für die die Veränderungen der Häufigkeit bestimmter Extremereignisse, und nicht der direkte Grund dafür. Zusätzlich ist eine klare Trennung zwischen dem Klimawandel und den vom Menschen beeinflussten Faktoren sehr schwierig. Zusammenfassend kann man anhand möglichen Szenarien davon ausgehen, dass in Zukunft ein genereller Trend einer Zunahme von alpinen Naturkatastrophen infolge des Klimawandels zu beobachten sein werden, welche aber aus dokumentierten Ereignissen nicht gesichert abgeleitet werden kann.

Im nächsten Kapitel werden prähistorische, historische und aktuelle Extremereignisse veranschaulicht, um zu zeigen, dass es sich hierbei nicht nur um ein gegenwärtiges Phänomen handelt, sondern bereits in der Vergangenheit zu Herausforderung und Schwierigkeiten geführt hat.

Im neunten Kapitel geht es um die zentrale Frage, inwiefern die derzeitigen Schutzmaßnahmen im österreichischen Alpenraum ausreichend Schutz vor Extremereignissen bieten. Um dies herauszufinden, werden die derzeitigen Schutzmaßnahmen, nämlich die Frühwarn- und Monitoringsysteme vorgestellt. Es lässt sich dabei feststellen, dass niemals ein 100%iger Schutz gewährleistet werden kann, da man mit Überlastfällen und Restrisiken rechnen muss. Deswegen ist der Erhalt von Schutzzielen, eine richtig durchgeführte Risikoanalyse, das vertrauensvoll durchgeführte Förderungsmanagement, sowie das Risikomanagement für die Steuerung und Überwachung mit möglichen Katastrophen oberste Priorität. Darüber hinaus spielt die Anpassung des Verhaltens der Menschen und die Verbesserung des Gefahrenbewusstseins eine wichtige Rolle.

12. Ausblick

In diesem Kapitel sollen einige Maßnahmen und Vorschläge gezeigt werden, die zu einer Umgestaltung und Verbesserung der derzeitigen Situation führen sollen.

1.) Im Umgang mit Naturgefahren spielen Information, Kommunikation und Partizipation eine sehr wichtige Rolle. Demnach muss öffentlich über alle möglichen Risiken kommuniziert werden, um keine Verunsicherung zu erzeugen. Diese

Risikokommunikation dient der Fähigkeit der Bevölkerung, Risiken zu beurteilen und akzeptieren zu können. Es sollten sowohl InteressensträgerInnen, als auch die BürgerInnen involviert werden, um Entscheidungen gemeinsam zu treffen und zu agieren. (vgl. RUDOLF-MIKLAU 2018: 32)

2.) Ein weiterer Punkt ist die Berücksichtigung der BürgerInnen bei der Auswahl von richtigen Schutzsystemen. Hierbei sollte zuerst untersucht werden, welche Risiken von der Gesellschaft akzeptiert bzw. deren individuelle Wahrnehmungen integriert werden, um entsprechende Schutzmaßnahmen zu treffen. (vgl. SCHNEIDERBAUER ET AL. 2018: 62)

3.) Laut Schneiderbauer et al. ist die Kommunikation des Restrisikos zukünftig notwendig. Die Bevölkerung sollte darüber informiert sein, dass es keinen 100%igen Schutz gegen Naturgefahren geben kann und dass auf jeden Fall mit einem gewissen Restrisiko gerechnet werden muss. Eine verbesserte Kommunikation würde somit einer verbesserten Wissensvermittlung dienen und die Gesellschaft auf eine bessere Berücksichtigung des Restrisikos ermöglichen. Da es auch noch keine einheitliche Terminologie für den Begriff „Restrisiko“ gibt, wäre eine klare und allgemeine Definition darüber von Vorteil. (vgl. SCHNEIDERBAUER ET AL. 2018: 61ff) Um die angeführte Kommunikation zu ermöglichen, werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- Wissensvermittlung über die Auswirkungen der Naturgefahren
- Eine verbesserte Informations- und Kommunikationsvermittlung
- Abhalten von Kommunikationskampagnen
- Berücksichtigung früherer Ereignisse
- Entwicklung von länderübergreifenden Kommunikationsstrategien
- Einsatz von neuen Medien und Entwicklung von Apps und neuen Lernformen
- Zusammenarbeit mit örtlichen Vertreibern
- Einsatz und Verwendung von Infrastruktur. (vgl. SCHNEIDERBAUER ET AL. 2018: 63)

4.) Zusätzlich sollten folgende Aspekte nach Mergili und Glade berücksichtigt werden:

Sorgfältige Dokumentation von früheren sowie aktuellen Erfahrungen von Extremereignissen

- Wissenschaftliche Erkenntnisse im Zusammenhang mit den möglichen Auswirkungen des Anstiegs von Extremereignissen auf die Gesellschaftssysteme
- Verstärkte Einsatz von Fernerkundungsmethoden wie Satellitendaten, Befliegungen (Luftbilder) und terrestrischen Aufnahmen
- Verstärkte Einsatz von Radarmessungen, da Unsicherheiten bezüglich einiger Variablen bestehen
- Nicht nur die Ereignisse, sondern auch die Schäden an Objekten werden dokumentiert, um die Vulnerabilität gegenüber den Ereignissen besser abschätzen zu können
- Arbeiten an dem Datendefizit bezüglich Vulnerabilität
- Weiterführende Detailstudien zu Gefahrenzonenkarten durchführen
- Anpassung der Sicherheitsstandards in Baurechtsnormen und bautechnischen Normen
- Reflexion über wirtschaftlich vertretbaren und wirksamen Maßnahmen für den Schutz vor Extremereignissen
- Lokalisierung und weitere Maßnahmen bei lokal begrenzten Ereignissen
- Notwendigkeit einer strategischen Steuerung der Vorsorge für extreme Naturkatastrophen
- Bedarf an inter-, intra- und transdisziplinärer Zusammenarbeit in allen Bereichen. (vgl. MERGILI ET GLADE 2019: 38ff)

5.) Um die möglichen Auswirkungen eines Klimawandels hinsichtlich einer Nachhaltigkeit besser verstehen zu können, sollten in Zukunft folgende Themen bearbeitet werden:

- Die vielfältigen Wechselwirkungen der klimatologischen und hydrometeorologischen Faktoren müssen prozessorientiert durch Geländeuntersuchungen und ergänzende Modellierungen aufgearbeitet werden
- Die vergangenen Situationen müssen den momentanen Gegebenheiten und den möglichen zukünftigen Entwicklungen gegenübergestellt werden

- In Prozessuntersuchungen muss eindeutig zwischen vorbereitenden, auslösenden und kontrollierenden Faktoren unterschieden werden. Dies wird eine bessere Abschätzung der Auswirkungen der Änderungen im Klimasystem bei den verschiedenen Naturgefahren erlauben. Spezifisch für jede Naturgefahr müssen die möglichen, menschlichen Eingriffe identifiziert und ihre Bedeutung in der jeweiligen Kinematik abschätzt und kalkuliert werden
- Die natürlichen und menschlichen Eingriffe müssen vergleichend bewertet werden, um Auswirkungen der Änderungen einzelner Faktoren für spezifische Naturgefahren eindeutig abschätzen zu können.
- Die Kaskadeneffekte zwischen den einzelnen Naturgefahren müssen stärker berücksichtigt werden. (GLADE et al 2017: 188f)

6.) Die größte Herausforderung durch den Klimawandel ist die Zunahme von Starkniederschlägen. Aufgrund dessen nehmen viele Ereignisse, sowie deren Intensität und Häufigkeit zu. Somit müssen die Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung an die zu erwartenden Ereignisse angepasst werden. Hierfür ist eine Analyse der Niederschlagsereignisse und des zukünftigen Klimas notwendig. Da aber die Zukunftsszenarien mit einer bestimmten Unschärfe behaftet sind, sind Aussagen über das Verhalten des Niederschlags vor dem Hintergrund des Klimawandels eine deutlich größere Herausforderung. Der Grund dafür ist die hohe, zeitliche und räumliche Variabilität und die jeweilige lokale, hydrologische Situation. Außerdem gehört die Bildung von Niederschlägen und Wolken zu den am schwierigsten zu modellierenden, physikalischen Prozessen der Atmosphäre. (vgl. KIRNBAUER ET AL. 2016: 59f) Besonders wichtig ist die Frage, wie sich Niederschlagsrisiken zufolge des Klimawandels in der Zukunft verhalten werden. (vgl. ebd.: 67)

Es sollte vor allem untersucht werden, welche beobachtbaren Veränderungen in der Reliefsphäre auf den Klimawandel und welche auf den direkten und indirekten Einfluss menschlicher Aktivitäten zurückzuführen sind. Solange keine klare Trennung gezogen wird, wird es schwierig sein, eine klare Zuordnung zu den Wirkungen und Ursachen des klimatischen Einflusses auf die Reliefsphäre zu identifizieren. Da der Klimawandel unterschiedliche Bereiche beeinflussen kann, sollte untersucht werden, welchen Einfluss der Klimawandel kurz-, mittel- und langfristig auf Veränderungen in der Vorbereitung, dem Auslöser und dem Bewegungsablauf bei

gravitativen Massenbewegungen hat. Nach einer intensiven Auseinandersetzung mit den folgenden Fragestellungen wäre es von Vorteil, wenn man sich mit der Frage, inwiefern gesellschaftliche Auswirkungen, die durch den Klimawandel hervorgerufen werden, Veränderungen in der Reliefsphäre haben, auseinandersetzt. Der Einfluss des Klimawandels auf gravitative Massenbewegungen ist zwar sichtbar, dennoch sind die Auswirkungen des Klimawandels und der menschliche Einfluss nicht klar zu trennen. (vgl. GLADE 2014: 589ff)

7.) Ein weiterer Punkt ist, dass Österreich künftig auf lange, meteorologische Beobachtungsdaten aufbauen sollte, die mit modernen Beobachtungssystemen für die verbesserte Erfassung von Verdunstung, Bodenwassergehalt, Bodenfeuchte, Hitze, Kälte, Trockenheit und Dürre zu erweitern sind (vgl. SCHÖNER ET HASLINGER 2019: 93).

8.) Die zunehmende Herausforderung im Umgang mit Naturgefahren, die Zunahme klimabedingter Extremereignisse, die nicht vollständig beherrscht werden, und die Folgen des gesellschaftlichen Wandels spielen für Interessen- und Verantwortungsträger eine wichtige Rolle. Aufbauend auf einem Risikokonzept sind für die zukünftige Sicherheitsplanung ein systematisch anwendbares Konzept für das Risikomanagement, der Überblick über die relevanten Gefahren, Schadenswirkungen und Risiken, sowie die objektiven Kriterien für die Sicherheitsbeurteilung und Umsetzung von Maßnahmen von Bedeutung. (vgl. RUDOLF-MIKLAU 2018: 64)

9.) Die richtige Balance zwischen Vertrauen in Schutzmaßnahmen, Risikoabschätzung und Erinnerung an vergangene Ereignisse, ist die beste Möglichkeit für den Umgang mit Naturgefahren bzw. Extremereignisse und deren Folgen.

Literaturverzeichnis

AHRENS B. und FORMAYER H. (2014): Zukünftige Klimaentwicklung, Band 1 Kapitel 4. – In: Österreichischer Sachstandbericht Klimawandel 2014 (Hrsg.) – Wien, 302-338.

ANDRECS P., HAGEN K., FROMM R., GRAUER P., HÖLLER P., KLEBINDER K., KOHL B., LANG E., MARKAT G., PERZL F., STARY U. und ZEIDLER A. (2010): AdaptEvent. Analyse der Sicherheit und Genauigkeit von Bemessungswerten bei gravitativen alpinen Naturgefahren und Ableitung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel, Endbericht des BFW im Auftrag des BMLFUW im Rahmen des EU Projekts AdaptAlp (Adaptation to Climate Change in the Alpine Space). – Wien, 321 S.

AUSTRIAN SPECIAL REPORT 2018 (ASR18) (2018): Österreichischer Special Report: Gesundheit, Demographie und Klimawandel (ASR18). – In: Austrian Panel on Climate Change (Hrsg.). – Wien, 325 S.

BIRKMANN J. (2008): Globaler Umweltwandel, Naturgefahren, Vulnerabilität und Katastrophenresilienz. – In: Raumforschung und Raumordnung, Spatial Research Planning 66 (1), 4-20.

BIRKMANN J. (2011): First- and second-order adaptation to natural hazards and extreme events in the context of climate change. – In: Natural Hazards 58 (2), 811-840.

BELL R., PETSCHKO H. und GLADE T. (2013): Gefährdungsmodellierung bei gravitativen Massenbewegungen. – In: NÖ Geotage (Hrsg.): Geogene Gefahren und Raumordnung. – Rabenstein an der Pielach, 54-59.

BELL R., MAYER J., POHL J., GREIVING S. und GLADE T. (2010): Zur Bedeutung eines integrativen Frühwarnsystems für gravitative Massenbewegungen. – In: BELL R., MAYER J., POHL J., GREIVING S. und GLADE T. (Hrsg.): Integrative

Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS): Monitoring, Modellierung, Implementierung. – Essen, 11-16.

BMLFUW (BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT) (Hrsg.) (2006): Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Priorisierung von Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung. – Wien, 3-56. (online unter: https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:06785a80-8c2d-4fcb-85af-c02a2a5d2e16/Wirtschaftlichkeitsuntersuchung_20und_20Priorit_tenreihung.pdf, zuletzt abgerufen am 02.06.2021).

BMLFUW (BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT) (Hrsg.) (2015): Leben mit Naturgefahren: Ratgeber für die Eigenvorsorge bei Hochwasser, Muren, Lawinen, Steinschlag und Rutschungen. – In: Bundesministerium für ein lebenswertes Österreich. – Wien, 2-36. (online unter: https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:08832d46-b9d1-4763-b794-7cf264852dbf/B%20+%20Barrierefrei%20-%20Leben%20mit%20Naturgefahren_Stand_150409_BF.pdf, zuletzt abgerufen am 02.06.2021).

BORDAT J. (2013): Bewertung von Personenschäden: Ethische und rechtliche Aspekte. – In: Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 77 (172), 146-152.

BRAUNER M., BRAUNSTINGL R. und LAIMER H.-J. (2015): Monitoring von Gravitativen Massenbewegungen. – In: Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung, Fachliche Empfehlungen & Materialienband, ÖROK-Schriftenreihe Nr. 193: Österreichische Raumordnungskonferenz. – Wien, 241-245.

CHAVEZ M., GHIL M. und URRUTIA-FUCUGAUCHI J. (2015): Extreme Events: Observations, Modeling and Economics. – In: American Geophysical Union. – New Jersey, Wiley, Washington D.C., 9-63.

CRUDEN D. M. und VARNES, D. J. (1996): Landslide Types and Processes. – In: Special Report – National Research Council 247 (76), 1-75.

CONNORS S., MATTHEWS J.B.R., CHEN Y., ZHOU X., GOMIS M.I., LONNOY E., MAYCOCK T., TIGNOR M. und WATERFIELD T. (Hrsg.) (2019): Global warming of 1.5° C. – In: IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, In the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, 630 S.

CRUDEN D. M (1991): A simple definition of a landslide. – In: Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 27-29.

DIKAU R. und GLADE T. (2003): Nationale Gefahrenhinweiskarte gravitativer Massenbewegungen. – In: LIEDTKE H., MÄUSBACHER R. und SCHMIDT K.-H. (Hrsg.): Relief, Boden und Wasser: Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, Institut für Länderkunde. – Leipzig, 98-99.

DIKAU R. und GLADE T. (2002): Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. – In: Geographische Rundschau 54 (1), 38-45.

DIKAU R. und GLADE T. (2001): Gravitative Massenbewegungen – vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. – In: Petermanns Geographische Mitteilungen 145 (6), 42-53.

DIKAU R., EIBISCH K., EICHEL J., MESSENZEHL K. und SCHLUMMER-HELD M. (2019): Geomorphologie. – Frankfurt am Main, 189-225.

ENGL D.-A. und KIEFFER D.-S. (2014): Monitoringmethoden zur Beobachtung von Hangbewegungen: Methodenüberblick und Anwendungsbeispiele. – In: Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 78 (173), 68-89.

ENGL D.-A. (2016): Geologische Gefahren am Hang – der Status Quo in Österreich – In: Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 80 (178), 78-87.

ELVERFELD K., GLADE T. und DIKAU R. (2007): Naturwissenschaftliche Gefahren- und Risikoanalyse. – In: FELGENTREFF C. (Hrsg.): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. – Berlin, 31-45.

FLEISCHHACKER V. (2018): Klimawandel und Wintersporttourismus in Österreich 2030. – Wiesbaden, 259-282.

FUCHS S. und KEILER M. (2016a): Vulnerabilität und Resilienz – zwei Komplementäre im Naturgefahrenmanagement? – In: FEKETE A. und HUFSCHMIDT G. (Hrsg.): Atlas der Verwundbarkeit und Resilienz – Pilotausgabe zu Deutschland, Österreich, Liechtenstein und Schweiz. – Köln & Bonn, 50-51.

FUCHS S. (2009): Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria – Paradigma of vulnerability revisited. – In: Natural Hazards and Earth System Science 9 (2), 337-352.

GLADE T., HOFFMANN P. und THONICKE K. (2017): Dürre, Waldbrände, gravitative Massenbewegungen und andere klimarelevante Naturgefahren. – In: BRASSEUR G., JACOB D. und SCHUCK-SÖLLER S. (Hrsg.): Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. – Berlin, Heidelberg, 111-118.

GLADE T. und PÖPPL R. (2013): Naturgefahren- und Risikoforschung im Alpenraum – eine Einführung. – In: Geographie und Schule 204 (35), 3-15.

GLADE T. (2014): Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre, Band 2 Kapitel 4. – In: Österreichischer Sachstandbericht Klimawandel 2014, 558-592.

GLADE T. und RUDOLF-MIKLAU F. (2015): Zusammenfassung der ÖREK-Partnerschaft: Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung. – In: ÖROK-Schriftenreihe 193, 13-17.

GLADE T. & CROZIER M. J. (2005): Landslide hazard and risk - Concluding comment and perspectives. – In: GLADE T., ANDERSON M. und CROZIER M. (Hrsg.): Landslide hazard and risk. – Wiley, Chichester, 767-774.

GLADE T. und STÖTTER H. (2008): Gravitative Massenbewegungen und Schneelawinen. –In: FELGENTREFF C. und GLADE T. (Hrsg.): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. –Heidelberg, 151-164.

GLADE T. und FELGENTREFF C. (2008): Naturereignisse sind unausweichlich, Katastrophen nicht? – In: FELGENTREFF C. und GLADE T. (Hrsg.): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. – Heidelberg, 443-448.

GLADE T. und PÖPPL R. (2013): Naturgefahren- und Risikoforschung im Alpenraum – eine Einführung. – In: Geographie und Schule 204 (35), 4-11.

GLADE T. und ZANGERL C. (2019): Gravitative Massenbewegungen – Terminologie und Charakteristika. – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 367-382.

GLADE T. (2019): Was sind Extremereignisse? – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 59-70.

GREIVING S. (2010): Risikomanagement. – In: BELL R., MAYER J., POHL J., GREIVING S. und GLADE T. (Hrsg.) (2010): Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung. – Essen, 203- 230.

HAGER K. (2019): Schutz kritischer Infrastrukturen. – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 667-676.

HIGHLAND L.-M. und BOBROWSKY P. (2008): The landslide Handbook – A guide to understanding landslides. – In: U.S. geological survey circular, 147 S.

HAIMBERGER L. und SEIBERT P. (2014): Das globale Klimasystem und Ursachen des Klimawandels, Band 1, Kapitel 1. – In: Österreichischer Sachstandbericht Klimawandel 2014, 138-166.

HÖPPE P. (2008): Naturgefahren und Klimawandel: die Rolle der Versicherungswirtschaft. – In: Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung, 110-115.

HÜBL J. und BECK M. (2019): Ereignisdokumentation 2019. – In: Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (Hrsg.). – Wien.

HÜBL J. und MIKOS M. (2014): Monitoring von Murgängen. – In: Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 78 (173), 50-67.

IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis, Report, Contribution of Working Groups to the Forth Assessment Report. – In: Intergovernmental Panel on Climate Change, 112 S.

KAITNA R., PRENNER D. und HÜBL J. (2019): Muren. – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 489-510.

KEILER M., KNIGHT J. und HARRISON S. (2010): Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. – In: Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, physical and engineering sciences 368 (1919), 2461-2479.

KENNER R. und PHILLIIPS M. (2017): Fels- und Bergstürze in Permafrost Gebieten: Einflussfaktoren, Auslösemechanismen und Schlussfolgerungen für die Praxis, Schlussprojekt Arge Alp Projekt, Einfluss von Permafrost auf Berg- und Felsstürze. – Tirol, 2-33.

KIRNBAUER R., PISTOTNIK G. und BLÖSCHL G. (2016): Klimawandel als Herausforderung für die Wildbachverbauung – In: Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 80 (178), 58-77.

KUHN M. (2010): Klimawandel und Gletscherschwund. – In: ÖWAV (Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaft) (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich, 49-60. LENHARDT W., HAMMERL C., DE PUY PAPI-ISABA M. und WEGINGER S. (2019): Erdbeben. – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 587-604.

LOTTER M. und HABERLER A. (2013): Geogene Naturgefahren – gravitative Massenbewegungen und ihre Ursachen. – In: NÖ Geotage, Berichte der Geologischen Bundesanstalt, Band 100. – Rabenstein an der Pielach, 5-14.

MASSON-DELMONTE V., ZHAI P., PÖRTNER H.-O., ROBERTS D., SKEA J., SHUKLA P.-R., PIRANI A., MOUFOUMA-OKIA W., PÉAN C., PIDCOCK R., MIKLAU-RUDOLF F. und HÜBL J. (2009): Alpine Naturkatastrophen: Lawinen, Muren, Felsstürze und Hochwasser. – In: Internationale Forschungsgesellschaft Interprevalent (Hrsg.). – Graz, Stuttgart.

MERGILI M. und GLADE T. (2019): Synthese. – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 31-41.

MÖLK M., SAUSGRUBER T., BÄK R. und KOCIU A. (2011): Standards and Methods of Hazard Assessment for Rapid Mass Movements (Rock, Fall and Landslide) in Austria. – In: Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 74 (166), 88-99.

NEO SLIDE – MONITORING GRAVITATIVER MASSENBEWEGUNGEN (2021): Gravitative Massenbewegungen: (online unter: www.noeslide.at/index.php/de/gravitative-massenbewegungen, zuletzt abgerufen am 26.05.2021)

OLEFS M. und FORMAYER H. (2021): Klimawandel – Auswirkungen mit Blick auf den Tourismus. – In: PRÖBSTL-HAIDER U., LUND-DURLACHER D., OLEFS M. und PRETTENTHALER F. (Hrsg.): Tourismus und Klimawandel. – Wien, Graz, 17-40.

OTTO J.-C., KRAUTBLATTER M. und SATTLER K. (2019): Permafrostgefahren. – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 537-561.

ÖROK (ÖSTERREICHISCHE RAUMORDNUNGSKONFERENZ) (2016): Rahmen, Erläuterungen, Empfehlungen & Beispiele. – In: ÖROK-Empfehlung Nr. 54: Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung. – Wien, 3-29.

PATEK M. (2007): Klimawandel und Naturgefahren. – In: Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. – Wien, 1-29.

PAPATHOMA-KÖHLE M., ULBRICH T., KEILER M., PEDOTH L., TOTSCHNIG R., GLADE T. SCHNEIDERBAUER S. und EIDSVIG U. (2014): Vulnerability to Heat Waves, Floods and Landslides in Mountainous Terrain: Test Cases in South Tyrol. – In: BIRKMANN J., KIENBERGER S. und ALEXANDER D. (Hrsg.): Assessment of Vulnerability to Natural hazards: a European Perspective, 179-201.

PERKINS-KIRKPATRICK S. und PITMAN A. (2018): Extreme events in the context of climate change. – In: Public Health Research & Practice 28 (4), 2-4.

PICHLER A. und SCHWENDTNER B. (2013): Naturgefahren und Personenrisiko – Herausforderungen, Möglichkeiten und Strategien. – In: Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 77 (172), 132-135.

PISTOTNIK G., HOFSTÄTTER M. und LEXER A. (2019): Starniederschlag und Hagel. – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, Vienna University Press, 144-172.

PLANAT (2013): Sicherheitsniveau für Naturgefahren. Nationale Plattform für Naturgefahren Planat. – Bern.

POPESCU M. (1994): A Suggested Method for Reporting Landslide Causes. – In: Bulletin of the IAEG (50). – Paris, 71-74.

PRINZ H. und STRAUSS R. (2018): Ingenieurgeologie, 6. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag. – München, 30-499.

PREH A., MÖLK M. und ILLEDITSCH M. (2019): Steinschlag und Felssturz. – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 425-459.

PROMPER C., STIX E., KOCIU A., KANONIER A., GLADE T. und RUDOLF-MIKLAU F. (2015): ÖREK-Partnerschaft - Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumordnung: Prozess und Ergebnisse. – In: Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 79 (175), 34-45.

RUDOLF-MIKLAU F. (2009): Naturgefahren-Management in Österreich: Vorsorge – Bewältigung: Information. – Wien.

RUDOLF-MIKLAU F. (2018): Umgang mit Naturkatastrophen: Ratgeber für Bürgermeister und Helfer. – Wien.

RUDOLF-MIKLAU F. und RIMBÖCK A. (2016): Komplexe Schutzsysteme gegen Naturgefahren: Systemdesign und Lebenszyklusmodell. – In: Baumtechnik (93), Heft 12, 875-883.

SATTLER K. und MEHLHORN S. (2019): Überblick über alpiner Naturgefahren in Österreich. – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 45-57.

SCHMIDT R., SAUSGRUBER T. und FRANDL T. (2014): Schwerpunkte im Fachbereich Monitoring und Messtechnik des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung. – In: Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 78 (173), 106-119.

SCHNEIDERBAUER S., BERGER H., HARTMANN S., RIMBÖCK A., DALLA TORRE C. und PEDOTH L. (2018): Der Umgang mit verbleibenden Risiko: Situationsanalyse und Herausforderungen im Alpenraum. – In: KANONIER A. und RUDOLF-MIKLAU F. (Hrsg.): Regionale Risiko Governance: Recht, Politik und Praxis: Handbuch. – Wien, 541-554.

SCHNEIDERBAUER S., HARTMANN S., DALLA TORRE C., DINKELACKER N., SANKOWSKY A., HOFFMANN C., PEDOTH L. und STREIFENEDER T. (2018): Über das Erwartete hinaus: Umgang mit dem Überlastfall und dem Restrisiko im Zusammenhang mit Naturgefahren im Alpenraum. Schlussbericht. – Bozen, Italien, 123S.

SCHÖNER W. und HASLINGER K. (2019): Extremtemperaturen und Trockenheit. – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 77-96.

SEILER W. (2006): Trends, Auswirkungen und Herausforderungen. – In: ALPENKONVENTION (Hrsg.): Der Klimawandel im Alpenraum. – Wien, 7-20.

SIDLE R. und HIROTAKA O. (2006): Landslide, Processes, Prediction and Land Use. –Washington.

SPEHN E. und KÖRNER C. (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Natur in den Alpen. – In: Natur und Landschaft, 92. Jahrgang, Heft 9/10, 407-411.

STÄNDIGES SEKRETARIAT DER ALPENKONVENTION (Hrsg.) (2019): Naturgefahren Risiko, Governance, Alpenzustandsbericht, Alpenkonvention Alpensignale, Sonderserie 7. – Innsbruck, 96 S.

STOFFEL M., TIRANTI D. und HUGGEL C. (2014): Climate change impacts on mass movements – Case studies from the European Alps. – In: The Science of the total environment, 1-12.

SVEN F. (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren – Herausforderungen für eine nachhaltige Landnutzung in alpinen Gebieten. – In: ÖWAV ÖSTERREICHISCHER WASSER- UND ABFALLWIRTSCHAFT (Hrsg.): Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich, 169-180.

THIEBES B., BELL R. und GLADE T. (2010): Regionale Frühwarnmodelle. – In: BELL, R. ET AL. (Hrsg.): Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung. – Essen, 151-154.

TOBLER D. und GRAF K. (2016): Der Einfluss des Klimas auf Rutschungen im periglazialen Prozessbereich der Alpen, FAN Herbstkurs 2016, GEOTEST AG, Zollikofen, 32-42.

VARNES D. (1978): Slope movement – types and processes. In: Landslides analysis and control, 11-33.

VOSS M. (2010). Resilienz, Vulnerabilität und transdisziplinäre Katastrophenforschung. – In: SIEDSCHLAG A. (Hrsg.): Jahrbuch für europäische Sicherheitspolitik 2009/2010. – Wien, 67-85.

WEISS G. (2003): Politische Strategien für einen nachhaltigen Schutz vor Naturgefahren. – In: Ländlicher Raum 4 / 2003, 1-7.

WIECZOREK G. und GLADE T. (2005): Climatic factors influencing triggering of debris flows. – In: JAKOB M. und HUNGR O. (Hrsg.): Debris flow hazards and related phenomena. – Heidelberg, 325-362.

WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (2019): Frühwarn- und Monitoringsysteme in Österreich – Zustandsbericht 2019, 4-89.

XIAO-CHEN Y., YI-MING W., BING W. und ZHIFU M. (2017): Risk management of extreme events under climate change. – In: Journal of Cleaner Production, 1-21.

ZANGERL C., MERGILI M., PRAGER C., SAUSGRUBER J.T. und WEIDINGER J.-T. (2019): Felsgleitung, Felslawine und Erd-/Schuttstrom. – In: ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 383-423.

Internetquellen:

BMLRT (2021): Gefahrenzonenplanung. (online unter: [Gefahrenzonenplanung, bmlrt.gv.at](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Investitionsmanagement. (online unter: [Investitionsmanagement, bmlrt.gv.at](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Häufigkeit und Intensität von Ereignissen. (online unter: [Häufigkeit und Intensität von Ereignissen , \(naturgefahren.at\)](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Die großen alpinen Naturkatastrophen in Österreich. (online unter: [Die großen alpinen Naturkatastrophen in Österreich, \(naturgefahren.at\)](#) zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Ereignisdokumentation: Durchführung und Institutionen. (online unter: [Ereignisdokumentation: Durchführung und Institutionen, \(naturgefahren.at\)](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Naturkatastrophen und Klimawandel. (online unter: [Naturkatastrophen und Klimawandel , \(naturgefahren.at\)](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Monitoring und Prognose von Ereignissen. (online unter: [Monitoring und Prognose von Ereignissen , \(naturgefahren.at\)](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Schlussfolgerungen aus der Analyse von Naturkatastrophen. (online unter: [Schlussfolgerungen aus der Analyse von Naturkatastrophen, \(naturgefahren.at\)](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Dokumentation von Naturkatastrophen. (online unter: [Dokumentation von Naturkatastrophen, \(naturgefahren.at\)](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Dokumentation von Wildbach- und Lawinenereignissen. (online unter: [Dokumentation von Wildbach- und Lawinenereignissen, \(naturgefahren.at\)](#) zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Alpine Naturgefahren im Portrait. (online unter: [Alpine Naturgefahren im Portrait](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Schäden durch alpine Naturkatastrophen. (online unter: [Schäden durch alpine Naturkatastrophen, \(naturgefahren.at\)](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

BMLRT (2021): Räumliche Verteilung gravitativer Massenbewegungen in Österreich. (online unter: [Räumliche Verteilung gravitativer Massenbewegungen in Österreich, \(naturgefahren.at\)](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

GLADE T. (2019): Experten warnen – Österreich nicht für alle neuen Extremereignisse gut aufgestellt! – In: Kleine Zeitung, 14.11.2019. (online unter: https://www.kleinezeitung.at/oesterreich/5722066/Experten-warnen_Oesterreich-nicht-fuer-alle-neuen-Extremereignisse, zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

WKO (2020): Leitfaden zur Auslegung der Begriffe “kritische Infrastruktur” und “Versorgungssicherheit” gemäß Verordnung LGBl. Nr. 25/2020: (online unter: <https://www.wko.at/service/t/aussenwirtschaft/Leitfaden-zur-Auslegung-VO-LGBl.-Nr.-35-2020.pdf>, zuletzt abgerufen am 01.06.2021).

ZAMG (2021): Extremereignisse: Wird das Klima immer verrückter? (online unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal->

[klimawandel/klimazukunft/europa/extremereignisse](#), zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

ZAMG (2021): Alpenraum. (online unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimazukunft/alpenraum>, zuletzt abgerufen am 01.06.2021)

ZAMG (2021): Klimafolgen. (online unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimafolgen>, zuletzt abgerufen am 01.06.2021)