

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Multi-Hazards im österreichischen Alpenraum: Zusammenspiel einzelner alpiner Naturgefahren sowie mögliche Schutzmaßnahmen zur Risikoverringerung

verfasst von | submitted by

Fiona Sarah Pachinger BEd

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of
Master of Education (MEd)

Wien | Vienna, 2024

Studienkennzahl lt. Studienblatt | Degree programme code as it appears on the student record sheet:

UA 199 500 510 02

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree programme as it appears on the student record sheet:

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Unterrichtsfach Bewegung und Sport Unterrichtsfach Geographie und wirtschaftliche Bildung

Betreut von | Supervisor:

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

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	IV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	V
KURZZUSAMMENFASSUNG	VI
ABSTRACT	VII
1 EINFÜHRUNG IN DAS THEMA.....	1
1.1 RELEVANZ DES THEMAS	1
1.2 AUFBAU UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT	2
2 FORSCHUNGSFRAGEN UND HYPOTHESEN.....	4
3 METHODIK	6
4 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	8
4.1 NATUREREIGNIS – NATURGEFAHR – NATURKATASTROPHE.....	8
4.2 MULTI-HAZARDS IM NATURGEFAHRENKONTEXT	12
4.3 EXTREMEREIGNISSE	13
4.4 VULNERABILITÄT UND EXPOSITION	14
4.5 RISIKO	15
4.6 KLIMAWANDEL.....	17
5 ANALYSE UND BEWERTUNG ALPINER NATURGEFAHREN.....	18
5.1 HAZARDFORSCHUNG (GEOGRAFISCHE RISIKOFORSCHUNG).....	18
5.2 GEFAHREN- UND RISIKOANALYSE ALPINER NATURGEFAHREN	20
5.3 ANALYSE DES SCHADENSPOTENTIALS	30
6 ALPINE MULTI-HAZARDS IM ÖSTERREICHISCHEN ALPENRAUM	33
6.1 DER ÖSTERREICHISCHE ALPENRAUM	33
6.2 ALPINE NATURGEFAHREN – EINE AUSWAHL	36
6.2.1 Gravitative Massenbewegungen.....	36
6.2.2 Schneelawinen.....	43

6.2.3	<i>Hochwasser</i>	47
6.3	MULTI-HAZARDS FÜHREN ZU EXTREMEREIGNISSEN	51
6.4	KLIMAWANDEL UND EXTREMEREIGNISSE IM ALPENRAUM	59
7	NATURGEFAHRENMANAGEMENT	68
7.1	INTEGRALES RISIKOMANAGEMENT - RISIKO GOVERNANCE	68
7.2	BERÜCKSICHTIGUNG ALPINER MULTI-HAZARDS IM NATURGEFAHRENMANAGEMENT	73
7.3	TECHNISCHE SCHUTZMAßNAHMEN ALPINER MULTI-HAZARDS	84
8	ZUSAMMENFASSUNG	91
9	DISKUSSION	93
10	AUSBLICK	97
	LITERATURVERZEICHNIS	100

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: THE RISK TRIANGLE	16
ABBILDUNG 2: ZUSAMMENHANG DER BEGRIFFE GEFAHR, SCHADENPOTENTIAL UND RISIKO	22
ABBILDUNG 3: AUSSCHNITT DES GEFAHRENZONENPLANS DER GEMEINDE NEUSTIFT IM STUBAITAL, 2017	28
ABBILDUNG 4: DIE HÖHENSTUFEN DER ALPEN, ALPENGRENZE NACH ALPENKONVENTION	34
ABBILDUNG 5: RAUM-ZEIT-ASPEKT BEI UNTERSCHIEDLICHEN TYPEN GRAVITATIVER MASSENBEWEGUNGEN	37
ABBILDUNG 6: MASSENBEWEGUNGEN IN ÖSTERREICH, AUSZUG AUS DER PROZESSDATENDANK DER GEOLOGISCHEN BUNDESANSTALT FÜR DAS GEBIET ÖSTERREICH.....	38
ABBILDUNG 7: SCHEMATISCHES BLOCKBILD EINER HANGMURE MIT TYPISCHEN CHARAKTERISTIKA IM GELÄNDE	40
ABBILDUNG 8: LAWINENGEFAHRENSTUFEN.....	46
ABBILDUNG 9: LAWINENGEFAHRENSTUFEN ÖSTERREICHISCHER ALPENRAUM AM SAMSTAG DEN, 23.12.23...	47
ABBILDUNG 10: 100-JÄHRIGE HOCHWASSERABFLÜSSE IN ÖSTERREICH.....	49
ABBILDUNG 11: ZUORDNUNG BEOBACHTETER VERÄNDERUNGEN DES MITTLEREN JÄHRLICHEN HOCHWASSERS ZU DEN DREI EINFLUSSFAKTOREN: KLIMA, LANDNUTZUNG UND WASSERBAULICHE MAßNAHMEN. 97 EINZUGSGEBIETE IN OBERÖSTERREICH, ABFLUSSDATEN 1950-2012	50
ABBILDUNG 12: HAZARD INTERACTION MATRIX.....	54
ABBILDUNG 13: NETZDIAGRAMM DER MÖGLICHEN GEFAHRENARTENVERKNÜPFUNGEN ZWISCHEN 21 NATURGEFAHREN	57
ABBILDUNG 14: AUSWIRKUNGEN EINZELNER WETTERBEDINGTER GEFAHREN AUF DIE EUROPÄISCHE BEVÖLKERUNG	62
ABBILDUNG 15: PROJIZIERTE ÄNDERUNG IN HITZETAGEN (T _{MAX} > 30 GRAD CELSIUS), JÄHRLICHEM MAXIMUM DER TAGESNIEDERSCHLÄGE UND JÄHRLICHEM MAXIMUM DER 5-TAGESNIEDERSCHLÄGE	65
ABBILDUNG 16: KREISLAUF DES INTEGRALEN RISIKOMANAGEMENTS	71
ABBILDUNG 17: DIMENSIONEN DER RISIKO-GOVERNANCE	72

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: INTERNATIONAL GEBRÄUCHLICHE LAWINENKLASSIFIKATION	45
TABELLE 2: ERKLÄRUNGEN HAZARD INTERACTION MATRIX	54
TABELLE 3: ABKÜRZUNGEN HAZARD INTERACTION MATRIX	55
TABELLE 4: WAHRSCHEINLICHSLEVEL BEOBACHTETER UND PROGNOTIZIERTER VERÄNDERUNGEN EXTREMER WETTER- UND KLIMAEREIGNISSE	60

Abkürzungsverzeichnis

BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technik
BML	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Schweiz)
BWV	Bundeswasserbauverwaltung
DIN	Deutsches Institut für Normung
GZP	Gefahrenzonenplan
HORA	Natural Hazard Overview & Risk Assessment Austria
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRGC	International Risk Governance Council
ISO	Internationale Organisation für Normung
ONR	Das österreichische Äquivalent von Austrian Standards International
SLF	Institut für Schnee- und Lawinenforschung
TRL-WB	Technische Richtlinien für den Wasserbau
TRL-WLV	Technische Richtlinien für die Wildbach- und Lawinenverbauung
UFAM	Bundesamt für Umwelt (Schweiz)
UNDRR	Büro der Vereinten Nationen für die Verringerung des Katastrophenrisikos
UNISDR	Internationale Strategie für Katastrophenvorsorge der Vereinten Nationen
WLV	Wildbach- und Lawinenverbauung

Kurzzusammenfassung

Diese Masterarbeit untersucht das Vorkommen verschiedener alpiner Naturgefahren, die im Zusammenspiel als Multi-Hazards bezeichnet werden, und analysiert die potentiellen Risiken und Kaskadeneffekte dieser gemeinsam auftretenden Naturereignisse.

Der zunehmende Klimawandel trifft das sensible Ökosystem der Alpen besonders stark und hat somit Auswirkungen auf die Intensität und Häufigkeit von Naturgefahren und damit verbundenen Risiken. Die Interaktionen und Wechselwirkungen zwischen den auftretenden Naturgefahren sind für Forscherinnen und Forscher und auch für Risikomanagerinnen und Risikomanager ein sehr komplexes Thema und führen dazu, dass notwendige Risikoszenarien schwerer vorhersehbar und damit schwer erstellbar werden.

Im Hauptteil dieser Forschungsarbeit wird zum einen eine relevante Auswahl von alpinen Naturgefahren dargestellt, zum anderen mögliche Interaktionen und Wechselwirkungen analysiert. Auf Grundlage dieser Darstellungen werden spezifische Risikoanalyseansätze erläutert. Die Analyse von Multi-Hazards im Alpenraum ist noch ein sehr junges Forschungsfeld und befindet sich derzeit in einem Prozess der Differenzierung und Vernetzung mit anderen Forschungsdisziplinen. Dieser Ansatz wird unter dem Begriff „Risiko-Governance“ in dieser Arbeit beschrieben.

In aktuellen Forschungsansätzen der Risikoanalyse, in Gefahrenzonenplänen sowie bei der Erstellung technischer Schutzmaßnahmen finden diese Multi-Hazards und Extremereignisse derzeit noch zu wenig Beachtung. Um jedoch präventive Maßnahmen zu verbessern, um Schäden durch Naturkatastrophen zu minimieren und die Resilienz in der Alpenregion zu stärken, ist es notwendig, die multiplen Einflussfaktoren in ein zukünftiges umfassendes und effektives Risikomanagement aufzunehmen.

Abstract

This master's thesis examines the occurrence of various alpine natural hazards, referred to collectively as multi-hazards, and analyzes the potential risks and cascade effects of these jointly occurring natural events. The increasing climate change particularly impacts the sensitive ecosystem of the Alps, thus affecting the intensity and frequency of natural hazards and associated risks. The interactions and interrelations among these natural hazards present a highly complex issue for researchers and risk managers, making necessary risk scenarios more difficult to predict and create.

In the main part of this research, a relevant selection of alpine natural hazards is presented, along with an analysis of possible interactions and interrelations. Based on these presentations, specific risk analysis approaches are explained. The analysis of multi-hazards in the Alpine region is still a very young field of research and is currently undergoing a process of differentiation and integration with other research disciplines. This approach is described under the term "risk governance" in this work.

In current research approaches to risk analysis, in hazard zone plans, and in the creation of technical protective measures, these multi-hazards and extreme events are currently receiving insufficient attention. However, to improve preventive measures, minimize damage from natural disasters, and strengthen resilience in the Alpine region, it is necessary to incorporate the multiple influencing factors into a future comprehensive and effective risk management.

1 Einführung in das Thema

„Eine Gefahr kommt selten allein“

Naturgefahren und Naturkatastrophen in den österreichischen Alpen sind kein neues Phänomen. Dennoch ist dieses Thema in Verbindung mit dem Klimawandel gerade jetzt aktueller denn je. Diese Arbeit befasst sich mit der Alpenregion als ein beeindruckender und wichtiger Lebens-, Wirtschafts- und Naturraum im Herzen Europas. Knapp zwei Drittel der Fläche von Österreich wird von den Alpen eingenommen. Auswirkungen und Schäden von Naturgefahren und Naturkatastrophen betreffen uns alle, direkt oder indirekt. Deshalb ist eine Bewusstmachung und Sensibilisierung dieser Problematik vor allem auch von Schülerinnen und Schülern im Geografieunterricht und in der Umweltbildung ein zentrales Thema. Die zunehmenden Medienberichte über Umweltkatastrophen bewirken vermehrt Ängste und Sorgen der jüngeren Generation. Somit kann festgestellt werden, dass dieses Thema inzwischen ein Teil der Lebenswelten vieler Schülerinnen und Schüler geworden ist. Im folgenden Kapitel wird die Relevanz des Themas erläutert sowie der Aufbau und die Zielsetzung der Arbeit vorgestellt.

1.1 Relevanz des Themas

Die Alpen sind ein einzigartiger Natur- und Lebensraum für zehntausende Pflanzen, Tiere und Menschen. Winter- und Sommertourismus in den Alpen sind für die österreichische Wirtschaft kaum mehr wegzudenken. Gleichzeitig steht der Alpenraum vor vielen Herausforderungen. Der Klimawandel trifft das sensible Ökosystem der Alpen besonders hart. Wir beobachten extreme Wetterereignisse und eine Zunahme zerstörender Naturereignisse in dieser Region. Aufgrund der derzeitigen klimatischen Veränderungen wird angenommen, dass Extremereignisse in der Natur tendenziell intensiver und häufiger auftreten werden. Auch sogenannte Multi-Hazards, ein Zusammenwirken mehrerer Naturereignisse, rücken verstärkt in den Fokus von Forschungstätigkeiten. Bei Multi-Hazards geht es nicht um eine einzelne alpine Naturgefahr, sondern um die Interaktion und das Wechselspiel mehrerer Naturereignisse. Es kann sich dabei um ein Zusammenspiel von Gefahren desselben

Gefahren typs oder um Gefahren unterschiedlicher Gefahrentypen handeln. Multi-Hazards können schnell zu Extremereignissen werden und damit enorme ökologische, wirtschaftliche und soziale Schäden anrichten. Somit hat dieses Thema auch eine bedeutende politische Dimension. Immer wichtiger ist daher ein entsprechend gutes und effektives Risikomanagement. Darunter versteht man Prävention, Bewältigung und Regeneration von Naturgefahren und Umweltschäden. Derzeitige Analysesysteme zur Gefahren- und Risikoerfassung decken aktuell nur Teilbereiche der benötigten Risikobewertungsprozesse ab. Komplexe Interaktionen, wie kaskadierende Effekte, sowie die zugrunde liegenden Unsicherheitsfaktoren bleiben oftmals unberücksichtigt (vgl. Schoepfer et al., 2024).

Die Risikoanalyse von Multi-Hazards und Kaskadeneffekten im Naturgefahrenkontext ist ein sehr junges Forschungsfeld und hat mein Interesse geweckt, den aktuellen Stand der Wissenschaft in dieser Arbeit darzulegen.

1.2 Aufbau und Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Masterarbeit mit dem Titel *„Multi-Hazards im österreichischen Alpenraum: Zusammenspiel einzelner alpiner Naturgefahren sowie mögliche Schutzmaßnahmen zur Risikoverringerung“* ist es, den Status quo zum Thema Multi-Hazards und Extremereignisse im österreichischen Alpenraum darzulegen, sowie Risikoanalysen von Multi-Hazards zu erörtern. Die Arbeit gliedert sich in fünf große Kapitel. Jedes dieser Kapitel wird in weitere Unterkapitel eingeteilt. Im Kapitel *„Theoretische Grundlagen“* werden wichtige Begriffe im Naturgefahrenkontext erläutert. Diese Definitionen und Erklärungen bieten ein einheitliches und besseres Verständnis für den weiteren Verlauf der Masterarbeit. Anschließend wird auf die Analyse und Bewertung von Naturgefahren im Allgemeinen eingegangen. Das Kapitel 6 widmet sich den alpinen Multi-Hazards im österreichischen Alpenraum. Dabei werden zunächst einzelne alpine Naturgefahren mit ihren jeweiligen Prozesseigenschaften beschrieben. Anschließend werden mögliche Kombinationen von Naturgefahren für den Alpenraum herausgearbeitet. Der Klimawandel ist aus dieser aktuellen Betrachtung nicht wegzudenken und somit werden Multi-Hazards und Extremereignisse in Verbindung mit klimatischen Veränderungen dargestellt. In Kapitel 7 geht es um das Naturgefahrenmanagement. Das Naturgefahrenmanagement befindet sich in einem stetigen Prozess der Weiterentwicklung. So wird heute in der wissenschaftlichen Literatur häufig vom

Risiko-Governance-Ansatz gesprochen. Es handelt sich hierbei um einen systemischen Ansatz im Umgang mit Naturgefahren der die Wichtigkeit der Zusammenarbeit und Kommunikation von unterschiedlichen Forschungsdisziplinen und Stakeholdern unterstreicht. In diesem Kapitel wird untersucht, inwiefern Multi-Hazards in derzeitigen Risikoanalysen berücksichtigt werden und ob aktuelle technische Schutzmaßnahmen ausreichen, um die Bevölkerung vor Multi-Hazard-Schäden zu schützen. Abschließend werden die Ergebnisse der Recherchen zusammengefasst und diskutiert.

2 Forschungsfragen und Hypothesen

Basierend auf dem aktuellen Forschungsstand zu Multi-Hazards im Alpenraum sowie deren Risikoanalysen und Schutzmaßnahmen werden im Rahmen dieser Masterarbeit zwei zentrale Hypothesen sowie die dazugehörigen Forschungsfragen untersucht. Die Hypothesen befassen sich mit der Dynamik und den Auswirkungen alpiner Naturgefahren sowie deren Berücksichtigung in Risikoanalysen und technischen Schutzmaßnahmen.

Hypothese 1: Einzelne alpine Naturgefahren verstärken sich stufenweise gegenseitig und werden so zu einem Extremereignis.

Forschungsfragen:

- Was versteht man unter alpinen Naturgefahren und Multi-Hazards?
- Welche Kombinationen von Multi-Hazards können in der Alpenregion auftreten?
- Inwiefern können Naturgefahren durch den Kaskadeneffekt zu Extremereignissen werden?

Um das Zusammenspiel einzelner Naturgefahren zu verstehen, werden zuerst einzelne alpine Naturgefahren erläutert sowie der Begriff Multi-Hazards erklärt. Folglich werden Beispiele von Multi-Hazards und Extremereignissen im Alpenraum aufgezeigt. Die Beantwortung dieser Forschungsfragen soll ein besseres Verständnis für die Interaktion verschiedener alpiner Naturgefahren und deren potentiellen Auswirkungen liefern.

Hypothese 2: Multi-Hazards werden in Risikoanalysen alpiner Naturgefahren und entsprechender Schutzmaßnahmen nicht beachtet.

Forschungsfragen:

- Wie werden Risikoanalysen alpiner Naturgefahren durchgeführt?
- Inwiefern werden alpine Multi-Hazards in Risikoanalysen berücksichtigt?
- Inwiefern werden Multi-Hazards in aktuellen Schutzmaßnahmen vor alpinen Naturgefahren sowie in Gefahrenzonenplänen der Alpenregion beachtet?

- Reichen aktuelle Schutzmaßnahmen aus, um die Bevölkerung der Alpenregion vor Multi-Hazards zu schützen?

Die Analyse dieser Forschungsfragen soll Aufschluss darüber geben, inwieweit bestehende Methoden und Maßnahmen den komplexen Herausforderungen durch Multi-Hazards gerecht werden und wo mögliche Defizite bestehen. Hierzu werden unterschiedliche Methoden der Risikoanalyse in der wissenschaftlichen Literatur sowie Gefahrenzonenpläne untersucht, um festzustellen, ob Multi-Hazards berücksichtigt werden. Ziel ist es, Handlungsempfehlungen für eine verbesserte Berücksichtigung von Multi-Hazards in der Risikoplanung und im Schutzmanagement zu entwickeln.

3 Methodik

Die vorliegende Arbeit basiert auf einer systematischen Literaturanalyse, die als Grundlage für die Untersuchung des Zusammenspiels von Naturgefahren im österreichischen Alpenraum und möglicher Schutzmaßnahmen zur Risikoverringung dient. Für den Zugang zur grundlegenden Literatur wurde eine umfassende Recherche über diverse Suchmaschinen, einschließlich U:search, Google Scholar, Scopus und ResearchGate, durchgeführt.

Die Auswahl der Literatur erfolgte nach mehreren Kriterien: Erstens wurde die Relevanz zum Thema berücksichtigt, indem vorrangig Arbeiten ausgewählt wurden, die sich direkt mit Multi-Hazards, Naturgefahren und Risikomanagement im alpinen Raum beschäftigen. Zweitens war die Aktualität ein wichtiges Kriterium, weshalb primär Publikationen aus den letzten zehn Jahren herangezogen wurden, um den aktuellen Stand der Forschung widerzuspiegeln. Drittens war der spezifische Bezug zum Untersuchungsgebiet, dem österreichischen Alpenraum, ein wesentliches Auswahlkriterium.

Als zentrale Referenz diente der Sammelband *„Extrema 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren“* von Thomas Glade, Martin Mergili und Katrin Sattler. Dieser Band bietet eine umfassende Übersicht über aktuelle Forschungsergebnisse zu Extremereignissen im alpinen Raum und ist daher besonders wertvoll für die vorliegende Masterarbeit.

Die ausgewählte Literatur wurde kritisch analysiert, indem eine detaillierte Untersuchung der Hauptthesen, Methoden und Ergebnisse der Publikationen durchgeführt wurde. Zudem wurden die Ergebnisse verschiedener Studien verglichen, um Widersprüche und Gemeinsamkeiten herauszuarbeiten. Neben wissenschaftlichen Publikationen wurden auch Gefahrenzonenpläne und rechtliche Rahmenbedingungen untersucht, um zu ermitteln, inwiefern Multi-Hazards berücksichtigt werden.

Die Literatur trägt zur Beantwortung der Forschungsfragen bei, indem sie Konzepte und Theorien zu Multi-Hazards und Risikomanagement bereitstellt, empirische Daten und Fallstudien liefert, die konkrete Beispiele und Erfahrungen aus dem Alpenraum dokumentieren, und Strategien sowie Maßnahmen zur Risikoverminderung aufzeigt, die bereits erfolgreich angewendet wurden oder in der Literatur vorgeschlagen werden.

Während der ersten Recherchearbeiten wurde erkannt, dass das Thema Multi-Hazards und Naturgefahren im Alpenraum sehr umfangreich ist. Daher wurde eine vorwärtsgerichtete

Literatursuche durchgeführt, wobei folgende Suchbegriffe verwendet wurden: Multi-Hazards, Multigefahren, Multirisiken, Kaskadeneffekt, alpine Naturgefahren, Alpenraum, Compound Effect, Extremereignisse, Risiko Governance, Naturgefahrenmanagement und Klimawandel. Zu jedem dieser Suchbegriffe existieren zahlreiche wissenschaftliche Fachartikel und Bücher. In dieser Arbeit wurde das Ziel verfolgt, einen Überblick über das breite Thema der Multi-Hazards zu geben und dabei stets einen Bezug zu den österreichischen Alpen herzustellen. Daher wurden unterschiedliche wissenschaftliche Werke herangezogen, exzerpiert und die relevanten Inhalte für die Beantwortung der Forschungsfragen zusammengefasst. Obwohl es bereits einige wissenschaftliche Publikationen zu Multi-Hazards und deren Risikoanalysen sowie Schutzmaßnahmen gibt, war es eine Herausforderung, Literaturquellen zu finden, die speziell auf den österreichischen Alpenraum bezogen sind.

Die systematische Literaturanalyse ermöglichte es, einen fundierten Überblick über den aktuellen Forschungsstand zu Multi-Hazards im österreichischen Alpenraum zu gewinnen und die Forschungsfragen der Arbeit umfassend zu beantworten.

4 Theoretische Grundlagen

Naturgefahren beziehungsweise Naturkatastrophen sind ein medial sehr geprägtes Thema. Im alltäglichen Gebrauch werden Begrifflichkeiten wie Naturereignis, Naturgefahr und Naturkatastrophe oft als Synonyme verwendet. Für ein besseres Verständnis werden im folgenden Kapitel einige Grundtermini der Thematik genauer definiert und erläutert.

4.1 Naturereignis – Naturgefahr – Naturkatastrophe

Die drei Begriffe Naturereignis, Naturgefahr und Naturkatastrophe können aufeinander aufbauend betrachtet werden und stehen in einem engen Zusammenhang. Die einzelnen Begriffe müssen aber dennoch in ihren Definitionen differenziert werden. In der wissenschaftlichen Literatur sowie auch in verschiedenen Ländern bestehen unterschiedliche Auffassungen der Begrifflichkeiten. Um ein gleiches Verständnis zu generieren, werden im Folgenden die Begriffe Naturereignis, Naturgefahr und Naturkatastrophe mithilfe international anerkannter Definitionen beschrieben.

Glade und Pöppl (2013) definieren ein Naturereignis (engl.: Natural event), angeglichen an die international anerkannte Definition der UNDRR 2009, folgendermaßen:

„Wenn ein natürlicher Prozess in unserer Umwelt auftritt, spricht man von einem Naturereignis. Jegliche Betrachtungen von Konsequenzen resultierend aus dem Auftreten werden nicht berücksichtigt.“ (Glade & Pöppl, 2013, S. 5)

Im Vergleich zu einem Naturereignis, bei dem die Auswirkungen keine Rolle spielen, werden bei einer Naturgefahr mögliche negative Auswirkungen für Menschen beziehungsweise Gesellschaft miteinbezogen (vgl. Sattler & Mehlhorn, 2020, S. 47). Dabei kann der potentielle Schaden nicht nur eine Bedrohung von Menschen sein, sondern auch von Umwelt, Sach- und Vermögenswerten (vgl. Rudolf-Miklau, 2009, S. 2).

Glade und Pöpl (2013) definieren den Begriff Naturgefahr (engl.: Natural hazard), angeglichen an die international anerkannte Definition der UNDRR 2009, folgendermaßen:

„Das Auftreten eines potentiell schadenbringenden natürlichen Prozesses, der mit einer bestimmten zeitlichen und räumlichen Wahrscheinlichkeit in einem definierten Raum auftreten kann, bezeichnet man als Naturgefahr.“ (Glade & Pöpl, 2013, S. 5)

Die internationale Strategie für Katastrophenvorsorge der Vereinten Nationen (UNISDR) beschreibt eine Naturgefahr wie folgt:

„Natural process or phenomenon that may cause loss of life, injury or other health impacts, property damage, loss of livelihoods and services, social and economic disruption, or environmental damage.“ (UNISDR, 2009, S. 20)

Naturgefahren können nicht nur einzeln, sondern auch nacheinander oder in Ursprung und Wirkung verknüpft auftreten. Dabei können Naturgefahren anhand mehrerer Kriterien beschrieben werden:

- Art des Prozesses
- Entstehungsort
- Intensität
- Magnitude
- Häufigkeit
- Eintrittswahrscheinlichkeit

(vgl. Sattler & Mehlhorn, 2020, S. 47)

Klassifikation von Naturgefahren

Naturgefahren werden häufig nach ihrer Ursache eingeteilt. Die Internationale Strategie für Katastrophenvorsorge der Vereinten Nationen gliedert Naturgefahren in folgende Kategorien:

1. **Meteorologische Naturgefahren** (z.B. tropischer Wirbelsturm, Tornado, Hagelsturm, Schneesturm, Extremniederschlag, Blitzschlag, Hitzewelle, Nebel)
2. **Hydrologisch-glaziologische Naturgefahren** (z.B. Überschwemmung, Sturzflut, Dürre, Schneelawine, Gletscherabbruch, Permafrostschmelze)
3. **Geologisch-geomorphologische Naturgefahren** (z.B. Erdbeben, Vulkaneruption, Tsunami, gravitative Massenbewegung, Bergsenkung, Boden- und Flusserosion)
Diese Naturgefahren werden weiters in endogene Ursachen (z.B. Tektonik, Magmatismus) und exogene Ursachen (z.B. Hangrutschung, Bodenerosion durch Niederschlag) unterschieden.
4. **Biologische Naturgefahren** (z.B. Epidemien, Waldbrände)
5. **Extraterrestrische Naturgefahren** (z.B. Meteoriteneinschlag)

(vgl. Dikau et al., 2020, S. 1104)

Zusätzlich zur Unterteilung von Naturgefahren werden in der Klassifikation von Gefahren auch **technologische Gefahren** (*man-made hazards*) und **Umweltzerstörung** als Kategorie erwähnt. Beide Kategorien werden durch den Menschen verursacht beziehungsweise verstärkt. Technologische Gefahren sind Gefahren in Verbindung mit technologischen und industriellen Unfällen und Abfällen sowie dem Zusammenbruch der Infrastruktur (z.B. Verschmutzung durch Industrieanlagen und Giftabfälle, Dammbruch). Unter Umweltzerstörung sind durch menschliches Verhalten oder Aktivitäten verursachte Phänomene zu verstehen, die natürliche Ressourcen zerstören oder natürliche Prozesse oder Ökosysteme negativ verändern. Die Auswirkungen sind dabei sehr unterschiedlich und können zu einer Zunahme der Verwundbarkeit, Frequenz und Intensität von Naturgefahren führen. Beispiele für Umweltzerstörungen sind Bodenerosion durch Wasser und Wind, Entwaldung, Verlust von Biodiversität oder Klimaveränderungen (vgl. Dikau et al., 2020, S. 1103–1107; vgl. Dikau & Weichselgartner, 2005, S. 21ff.).

Alpine Naturgefahren, welche in der hier vorliegenden Arbeit im Fokus stehen, treten aufgrund des zentralen Einflusses von Relief und Klima primär in Gebirgsregionen auf. Alpine Naturgefahren sind beispielsweise Felsstürze, Muren oder Schneelawinen. Weiters sind alpine Naturgefahren als natürliche Prozesse und Phänomene zu bezeichnen, welche Leben und Wirtschaft im alpinen Raum negativ beeinflussen können (vgl. Sattler & Mehlhorn, 2020, S. 47).

Extreme Naturgefahren werden als Naturkatastrophen bezeichnet. Naturkatastrophen werden in der Literatur häufig mithilfe der Definition der UNDRP beschrieben. Diese Definition wurde unter anderem auch von Elverfeldt et al. (2008) übernommen und ins Deutsche übersetzt.

„Eine Naturkatastrophe bezeichnet einen tatsächlich eingetretenen natürlichen Prozess bzw. eine realistische 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., 2008, S. 31)

Wie aus der Definition hervorgeht, ist unter einer Katastrophe nicht das Naturereignis per se zu verstehen, sondern dessen Wirkung auf die Menschen und deren Lebensraum. Naturkatastrophen können in unterschiedlichem Ausmaß auftreten. Dabei kann sich die Größenordnung auf die menschliche Betroffenheit (humanitäre Sicht) oder auf das Ausmaß des Schadens (ökonomische Sicht) beziehen (vgl. Rudolf-Miklau, 2009, S. 4).

Um einzelne Naturkatastrophen deutlicher beziehungsweise vergleichbarer zu machen, werden in einzelnen Definitionen Kriterien angegeben, anhand deren die Katastrophen eingeordnet werden können. Diese Kriterien helfen ebenso dabei, die Auswirkungen auf Menschen, Umwelt und Wirtschaft zu bestimmen. Häufige Kriterien sind *die Anzahl der Todesopfer, Verletzten und Obdachlosen, die Zahl der zerstörten oder beschädigten Häuser, die volkswirtschaftlichen Schäden oder monetäre Kosten der Rettungs- und Suchaktionen*. Allerdings sind alleine anhand dieser Kriterien die realen Auswirkungen einer Katastrophe nicht festzustellen, da die Definition, welches Ausmaß ein Naturereignis zur Naturgefahr werden lässt, nicht einheitlich ist (vgl. Dikau & Glade, 2001, S. 43).

4.2 Multi-Hazards im Naturgefahrenkontext

Unter Multi-Hazards versteht man den Zusammenhang und die Wechselwirkung mehrerer einzelner Naturgefahren. Dabei können die einzelnen Ereignisse gleichzeitig, kaskadenartig oder kumulativ im Laufe der Zeit auftreten (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 606f.).

Das Büro der Vereinten Nationen für die Verringerung des Katastrophenrisikos (UNDRR) definiert Multi-Hazards folgendermaßen:

“Multi-hazard means (1) the selection of multiple major hazards that the country faces, and (2) the specific contexts where hazardous events may occur simultaneously, cascadingly or cumulatively over time, and taking into account the potential interrelated effects.” (UNDRR, 2016)

Multi-Hazards sind Naturgefahren beziehungsweise verschiedene potentiell schadenbringende Prozesse, die sich gegenseitig beeinflussen und oft auch gegenseitig verstärken. Verstärken sich die einzelnen Prozesse stufenweise, spricht man von einem sogenannten Kaskadeneffekt. Durch den Kaskadeneffekt können Naturgefahren zu Extremereignissen werden (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 606).

Auch Kappes et al. (2012) beschreiben Multi-Hazards als Interaktion verschiedener relevanter Naturgefahren in einem bestimmten räumlichen Gebiet und/oder in einer bestimmten zeitlichen Periode (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 607).

Die weltweit bekannte Banqiao-Überschwemmung in der Province Henan in China im Jahr 1975 ist ein Beispiel für ein Extremereignis, welches durch Kaskadeneffekte verursacht wurde. Ein Taifun löste eine Überschwemmung eines Flusses aus. Durch diese Überschwemmung kam es zum Bruch des Banqiao Staudamms, was wiederum zu einer Flutwelle führte. Weitere 62 Staudämme wurden dadurch zerstört und eine mehrere Meter hohe Welle entstand, die mit einer Geschwindigkeit von knapp 50km/h flussabwärts zahlreiche Städte, Dörfer und tausende Quadratkilometer Land überflutete. Bei diesem Extremereignis kamen mehrere tausend Menschen ums Leben (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 606).

Durch dieses Ereignis wird deutlich, wie sich einzelne Vorgänge stufenweise verstärken können und folglich zu einem Extremereignis werden. Solche Kaskadeneffekte sind auch im österreichischen Alpenraum keine Seltenheit. Auch hier treffen mehrere Gefahrenprozesse zusammen, zum Beispiel ein Hangrutsch, der durch ein Hochwasserereignis ausgelöst wurde (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 607). Westen et al. (2014) differenzieren zudem zwischen gekoppelten Ereignissen, verknüpften Ereignissen (=Prozesskombinationen) und Ereignissen, die die Anfälligkeit für weitere Ereignisse verändern (= Prozessketten). Die Unterscheidung dabei ist die zeitliche Komponente. Gekoppelte und verknüpfte Ereignisse werden gleichzeitig ausgelöst während Prozessketten zwar im Zusammenhang stehen, aber zeitlich nacheinander ablaufen. Ein Beispiel für eine Prozesskette ist, wenn es durch einen Waldbrand zu Bodenschädigungen kommt. In weiterer Folge wird die Niederschlagsinfiltration verringert und es kommt dadurch zu einer erhöhten Anfälligkeit für Murgängen. Die veränderte Anfälligkeit für Murgänge hängt mit dem Prozess des Waldbrandes zusammen, allerdings ohne dem Effekt der direkten Auslösung (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 607).

4.3 Extremereignisse

Extremereignisse im Naturgefahrenkontext können als Ereignisse verstanden werden, die stark von einem statistischen Mittelwert oder beobachteten Trend abweichen. Extremereignisse sind außergewöhnliche Ereignisse, die oft mit negativen Konsequenzen für Mensch und Umwelt einhergehen. Wie hoch bei einem Ereignis die Wiederkehrperiode sein muss, um als Extremereignis zu gelten, wird nicht genau definiert. Ein Grund dafür ist, dass die Einstufung eines Extremereignisses einerseits von der Art und Häufigkeit der Ereignisse abhängig ist und andererseits vom gewählten räumlichen Maßstab. Zum Beispiel kann ein Ereignis lokal als extrem eingestuft werden, aber überregional im statistischen Normbereich liegen. Auch bei den Zeitspannen zwischen den Ereignissen muss zwischen lokal und überregional differenziert werden (vgl. Frei et al., 2003, S. 14f.). Allgemein kann ein Extremereignis in Österreich als ein seltenes Ereignis mit einer außergewöhnlich hohen Intensität definiert werden (vgl. Kaitna et al., 2020, S. 492).

4.4 Vulnerabilität und Exposition

Die beiden Begriffe „Vulnerabilität“ und „Exposition“ sind in der Naturgefahrenthematik unumgänglich. Vor allem für Gefahren- und Risikoanalyse alpiner Naturgefahren sind die Begriffe essenziell. Um ein einheitliches und besseres Verständnis der beiden Begriffe zu generieren, werden im Folgenden zwei kurze Definitionen angeführt.

Vulnerabilität/Verwundbarkeit (engl.: Vulnerability):

“The characteristics and circumstances of a community, system or asset that make it susceptible to the damaging effects of a hazard.” (UNISDR, 2009, S. 30)

Es gibt viele verschiedene Aspekte der Vulnerabilität (Anfälligkeit), die sich aus physischen, sozialen, wirtschaftlichen und natürlichen Faktoren zusammensetzen. Als Beispiele wären eine schlechte Planung oder ein schlechter Bau von Gebäuden, unzureichender Schutz von Vermögenswerten sowie begrenzte Vorsorgemaßnahmen anzuführen (UNISDR, 2009, S. 30).

Exposition (engl.: Exposure):

“People, property, systems, or other elements present in hazard zones that are thereby subject to potential losses.” (UNISDR, 2009, S. 15)

Maße für die Exposition können beispielsweise die Anzahl an Menschen oder Arten von Vermögenswerten in einem Gebiet sein (UNISDR, 2009, S. 15).

4.5 Risiko

Um im nächsten Kapitel auf die Risikoanalyse von Naturgefahren eingehen zu können, muss zunächst der Begriff Risiko im Naturgefahrenkontext näher beleuchtet werden. Das Risiko einer Naturgefahr bezieht sich auf die Wirkung von Naturereignissen. Die Gefahr hingegen, welche oft mit dem Begriff Risiko gleichgesetzt wird, bezieht sich auf das Eintreten des Naturereignisses (vgl. Rudolf-Miklau, 2009, S. 2).

Das Österreichische Normungsinstitut (2009) definiert den Begriff Risiko wie folgt:

„Risiko im weiteren Sinne ist die Möglichkeit, dass aus einem Zustand oder Vorgang, im konkreten Fall aus dem der Naturgefahr zugeordneten Ereignis, ein Schaden entstehen kann. Risiko im engeren Sinn ist die Wahrscheinlichkeit und Größenordnung eines möglichen Schadens.“ (zitiert nach Rudolf-Miklau, 2009, S. 3)

Glade und Pöpl (2013) orientieren sich bei der Definition von Risiko an eine international anerkannte Terminologie der UNISDR (2009) und beschreiben den Begriff Naturrisiko (engl.: Natural risk) folgendermaßen:

„Wenn zusätzlich zur Naturgefahr die Konsequenzen betrachtet werden, liegt ein Naturrisiko vor. Die Konsequenzen setzen sich hierbei zusammen aus den Risikoelementen (z.B. Häuser, kritische Infrastruktur, landwirtschaftliche Flächen, Menschen) und deren Empfindlichkeit (=Vulnerabilität/Verwundbarkeit) gegenüber einer bestimmten Intensität im Sinne deren Stärken (z.B. Schneedruck bei Schneelawinen, Ablagerungshöhe bei Muren, Fließgeschwindigkeit bei Hochwasser). In neueren Untersuchungen werden auch die „Bewältigungsfähigkeit“ und die „Anpassung“ einbezogen.“ (Glade & Pöpl, 2013, S. 5)

Crichton (1999) wiederum beschreibt den Begriff Risiko grafisch als ein Dreieck:

„The risk of a population to natural hazards has been defined by Crichton (1999) through the risk triangle, where the risk is a combination of the potential magnitude of the hazard, the exposure of the population in terms of where it is located in relation to impact of the hazard, and the vulnerability of the population in terms of how great the impact of damage may be.” (Kundzewicz, 2012, S. 14)

Crichton versteht unter Risiko die Wahrscheinlichkeit eines Verlustes. Dabei hängt das Risiko von drei Elementen ab: der Gefahr, der Vulnerabilität (Anfälligkeit) sowie der Exposition. Die Gefahr ist dabei wiederum abhängig von der Intensität und der Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses. Exposition bedeutet das einer Gefahr Ausgesetztsein und bezieht sich in einem Land auf die Bevölkerung, die Infrastruktur und die bebaute Umwelt. Die Vulnerabilität beschreibt die Schadensanfälligkeit der exponierten Elemente. In der grafischen Darstellung von Crichton bildet je eines dieser Elemente eine Seite des Dreieckes. Ist dabei ein Element beziehungsweise eine Seite des Dreiecks Null, so besteht kein Risiko. Kann ein Element reduziert werden, so verringert sich die Fläche des Dreiecks und somit verringert sich auch das Risiko (vgl. Crichton, 1999, S. 102f.).

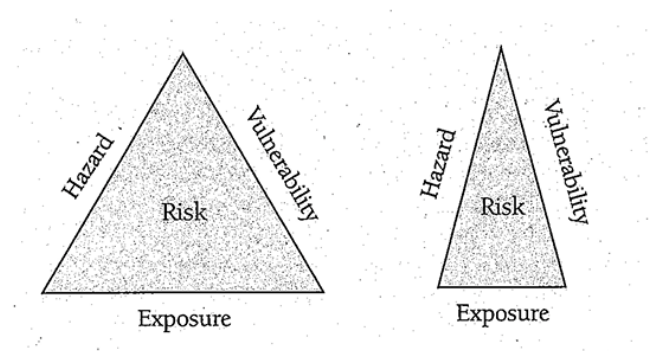


Abbildung 1: The Risk Triangle; (Quelle: Crichton, 1999, S. 103)

4.6 Klimawandel

Das Klima beschreibt alle meteorologischen Erscheinungen für ein bestimmtes geografisches Gebiet für einen bestimmten Zeitraum. Im Gegensatz zum Wetter, werden beim Klima die meteorologischen Erscheinungen über eine lange Zeitspanne, meist 30 Jahre, herangezogen und zusammengefasst. Während sich das Wetter ständig ändern kann, bleibt das Klima über einen langen Zeitraum gleich (vgl. Kuttler, 2013, S. 12). In den Medien sind extreme klimatische Veränderungen ein sehr präsent Thema. Aber auch wissenschaftlich wird der Klimawandel bestätigt. Der Klimawandel kann auf natürliche Ursachen, aber auch auf Einwirkungen durch den Menschen zurückgeführt werden. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts wird weltweit ein Anstieg der Durchschnittstemperatur beobachtet, welcher „sehr wahrscheinlich“ auf anthropogenes Handeln zurückzuführen ist. Der Weltklimarat (2023) schreibt dazu folgendes:

“Human activities, principally through emissions of greenhouse gases, have unequivocally caused global warming, with global surface temperature reaching 1.1°C above 1850-1900 in 2011-2020. Global greenhouse gas emissions have continued to increase, with unequal historical and ongoing contributions arising from unsustainable energy use, land use and land-use change, lifestyles and patterns of consumption and production across regions, between and within countries, and among individuals (high confidence).” (IPCC, 2023, S. 4)

Das Ausmaß, in dem heutige und zukünftige Generationen eine heißere und andere Welt erleben werden, hängt von unseren Handlungen und Entscheidungen ab, die wir jetzt und zukünftig treffen werden (vgl. IPCC, 2023, S. 7).

Die Auswirkungen und Risiken, die der Klimawandel mit sich bringt, können regional sehr unterschiedlich sein. Manche Regionen, so auch der Alpenraum, weisen eine sehr hohe Sensibilität auf und sind somit stark vom Klimawandel betroffen (vgl. UBA, 2007).

5 Analyse und Bewertung alpiner Naturgefahren

Ein ganzheitlicher Ansatz im Umgang mit Naturgefahren und allgemeinen Bedrohungen benötigt einen systematischen Prozess, der sich durch Prävention, Bewältigung und Wiederherstellung zusammensetzt. Grundlegend für diesen Ansatz sind vorangegangene sowie parallel durchgeführte Bewertungen von Gefahren und Risiken. Die Durchführung solcher Gefahren- und Risikoanalysen zielt im Allgemeinen darauf ab, die essenzielle Frage „Was kann passieren?“ zu beantworten (vgl. Kienholz, 2005, S. 14). Ziel der Risikoanalyse ist es, die Eintrittswahrscheinlichkeit sowie die Höhe und das Ausmaß des Schadens eines Prozesses bzw. eines Szenarios zu definieren, um so in späterer Folge die Risikohöhe feststellen und einordnen zu können (vgl. Bundesministerium für Inneres, 2018, S. 38f.).

Die Gefahren- und Risikoanalyse einschließlich der Gefahren- und Risikobewertung wird in Kapitel 5.2 beschrieben. Zuvor wird die Hazardforschung, welche sich mit systematischen Untersuchungen und Analysen von Naturgefahren und anthropogenen Gefahren beschäftigt, vorgestellt. Am Ende des Kapitels wird noch auf das mögliche Schadenpotential von Naturgefahren eingegangen.

5.1 Hazardforschung (geografische Risikoforschung)

Seit jeher war die Menschheit großen Naturereignissen und -katastrophen ausgesetzt, die das Leben und die Zivilisationen tiefgreifend beeinflusst haben. In frühen Gesellschaften wurden solche Ereignisse häufig als unausweichlich oder sogar als göttliche Strafen interpretiert, womit der Mensch diesen Naturgewalten scheinbar hilflos gegenüberstand. Ein systematischer Ansatz zur Minderung oder Vorbeugung dieser Naturgefahren existierte nicht, und jegliche Schutzmaßnahmen entstanden primär aus der direkten Erfahrung mit diesen Ereignissen. Diese initialen Bemühungen zur Gefahrenbewältigung waren somit meist ad-hoc und ohne fundierte wissenschaftliche Grundlage (vgl. Elverfeldt et al., 2008, S. 32ff.).

Mit dem Einzug der Aufklärung in Europa veränderte sich diese Perspektive grundlegend. Die Epoche der Aufklärung, geprägt von einem zunehmenden Vertrauen in die Vernunft und die wissenschaftliche Methode, leitete auch hinsichtlich des Umgangs mit Naturkatastrophen einen Paradigmenwechsel ein. Es begann die Suche nach rationalen Erklärungen und

systematischen Vorsorgemaßnahmen, die auf wissenschaftlichen Erkenntnissen basierten, um den Umgang mit Naturgefahren auf eine rationale Grundlage zu stellen (vgl. Pohl, 2008, S. 47–50).

Die eigentliche geographische Hazardforschung, wie wir sie heute kennen, hat ihre Ursprünge jedoch erst im 20. Jahrhundert, genauer in den Vereinigten Staaten der 1940er Jahre. Ein wesentlicher Meilenstein in der Entwicklung dieser Disziplin war die Arbeit von Gilbert Fowler White, der als der Begründer der modernen Hazardforschung gilt. Geboren im Jahr 1911, leistete White, ein Absolvent der Universität Chicago, entscheidende Beiträge zum Verständnis von Hazards als einer Interaktion zwischen Menschen und Umwelt. Seine Forschungen legten den Grundstein für ein neues Verständnis von Naturgefahren, bei dem nicht allein die Naturereignisse selbst, sondern vor allem die Beziehung zwischen diesen Ereignissen und den menschlichen Gesellschaften in den Fokus rückte (vgl. Pohl, 2008, S. 47–50).

White und seine Kollegen stellten in ihren Arbeiten die Frage, wie sich Hazards aus den spezifischen Eigenschaften eines bestimmten Umweltausschnitts und den Zuständen des gesellschaftlichen Systems ergeben. Diese Perspektive betont die Wichtigkeit, sowohl die physischen als auch die sozialen Dimensionen von Hazards zu verstehen, um effektive Strategien für das Risikomanagement und die Katastrophenvorsorge entwickeln zu können.

Durch diese Sichtweise veränderte die geographische Hazardforschung grundlegend den Ansatz im Umgang mit Naturgefahren. Anstatt Naturkatastrophen als unvermeidliche Ereignisse oder göttliche Strafen zu betrachten, ermöglichte sie eine systematische Analyse und Bewertung von Risiken. Bis in die 1970er-Jahre lag der Schwerpunkt der Naturgefahrenforschung großteils auf der Gefahrenerkennung und der räumlichen Verteilung von Naturgefahren (vgl. Pohl, 2008, S. 47–50).

Diese Sichtweise wurde zu dieser Zeit allerdings oftmals kritisiert, da die Auswirkungen der Schadensereignisse im bisherigen Ansatz allein den natürlichen Prozessen zugeschrieben wurden und die Gesellschaft außer Acht gelassen wurde. Seit den 1980er-Jahren hat sich das Verständnis für die Ursachen und Auswirkungen von Naturgefahren deutlich weiterentwickelt. Frühere Ansätze wurden durch die Einsicht ersetzt, dass gesellschaftliche Strukturen wie Legislative, Infrastruktur und Notfallplanung bestimmte Verwundbarkeiten (Vulnerabilität) gegenüber Risiken aufweisen. Es wurde erkannt, dass der Schaden, der durch Naturgefahren entsteht, nicht nur durch die Stärke des natürlichen Ereignisses selbst, sondern

auch durch die Resilienz der betroffenen Gesellschaft bestimmt wird (vgl. Elverfeldt et al., 2008, S. 32ff.).

Die Grundlagen der modernen Sicherheitswissenschaft, die die Risikoforschung maßgeblich beeinflusst hat, entwickelten sich in den 1950er-Jahren, vor allem im Zusammenhang mit der Luft- und Raumfahrt. Diese Forschungsbereiche mussten mit neuen, kostspieligen Technologien umgehen, die ein hohes Risikopotenzial bargen. Besonders seit der zivilen Nutzung der Atomenergie Ende der 1960er-Jahre wurde der Fokus darauf gelegt, Unfälle so unwahrscheinlich wie möglich zu machen, da diese als inakzeptabel galten. In den folgenden Jahrzehnten wurde die Risikoanalyse auch auf andere Industriebereiche (Chemie, Öl und Gasindustrie, Informationstechnologie) übertragen und weiterentwickelt (vgl. Elverfeldt et al., 2008, S. 32ff.).

Ab den 1990er-Jahren fand der ingenieurtechnische Ansatz auch in der Naturgefahrenforschung Anwendung und wurde im Sinne des Risikomanagements ausgeweitet, indem man die Bevölkerung in die Risikobewertung miteinbezog. Dies legte den Grundstein für die Entwicklung einer Risikokultur. Der Umgang mit Naturgefahren hat sich von einer reaktiven Haltung zu einer systematischen und vorausschauenden Planung entwickelt, die auf einer risikobasierten Schutzplanung basiert (vgl. Elverfeldt et al., 2008, S. 32ff.).

Die Forschung konzentriert sich nun auf drei Hauptbereiche: die Grundlagen- und Prozessforschung (z.B.: Berechnung von Hanginstabilitäten oder Ausbreitungsmerkmale von diversen Naturgefahren), regionale Ansätze zur Optimierung der Risikoanalyse und globale Vergleiche von Risikoverteilungen und Katastrophenhäufigkeiten, um globale Risiko-Hotspots zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen setzen zu können (vgl. Elverfeldt et al., 2008, S. 32ff.).

5.2 Gefahren- und Risikoanalyse alpiner Naturgefahren

Im Kontext der zunehmenden Bedrohung durch Naturkatastrophen stellt der österreichische Alpenraum ein exemplarisches Beispiel dar, in dem Schneelawinen, Überschwemmungen, Murenabgänge, Sturzprozesse sowie Rutschungen nicht nur eine latente Gefahr für Menschenleben und materielle Werte darstellen, sondern auch die Infrastruktur, darunter Gebäude und Verkehrswege, ernsthaft bedrohen. Besonders in urbanen und industriell genutzten Gebieten können solche Ereignisse verheerende Schäden verursachen. Verschärft

wird diese Situation durch die reduzierte Schutzfunktion von Wäldern, die Auswirkungen des Klimawandels und vor allem durch die gestiegene Wert- und Nutzungsdichte in Risikozonen. Infolgedessen wächst der gesellschaftliche Anspruch auf Sicherheit in diesen gefährdeten Gebieten. Um diesem Bedürfnis gerecht zu werden, sind präventive Maßnahmen wie forstwirtschaftliche und bauliche Projekte sowie die Implementierung von Raum- und Notfallplänen von essenzieller Bedeutung. Diese zielen darauf ab, ein möglichst umfassendes Schutzniveau gegenüber Naturgefahren zu gewährleisten (vgl. Bortler, 1999, S. 7).

Die Durchführung einer Risikoanalyse bildet dabei den grundlegenden Schritt, um das angestrebte Schutzniveau zu erreichen. Die Risikoforschung setzt sich aus drei interdisziplinären Teilen zusammen: der Risikoanalyse, welche die Gefahrenanalyse einschließt, der Risikobewertung und dem Risikomanagement. Während sich dieses Kapitel auf die Erörterung der ersten beiden Säulen des Risikokonzepts konzentriert, widmet sich Kapitel 7 ausführlich dem Risikomanagement. Dieses umfasst die Anwendung spezifischer Maßnahmen und Methoden mit dem Ziel, ein definiertes Sicherheitsniveau zu erreichen und die Sicherheitsstrategien an veränderte Bedingungen anzupassen (vgl. Bortler, 1999, S. 7).

Wie bereits im Kapitel 4.1 dargestellt, beschreiben Glade und Pöpl (2013) eine Naturgefahr als einen natürlichen Prozess, welcher mit einem potentiellen Schaden verbunden ist. Der natürliche Prozess kann dabei in einem betrachteten Gebiet mit einer bestimmten räumlichen und zeitlichen Wahrscheinlichkeit auftreten. Der Begriff Risiko im Naturgefahrenkontext bezeichnet die Möglichkeit des Eintritts eines schadenverursachenden Ereignisses (z.B. Überschwemmungen) und dessen potentiellen Schadenswirkungen. Dabei kann das Ausmaß des Schadens unterschiedlich sein. Drei Faktoren sind für die Schwere des entstehenden Schadens einer Naturgefahr besonders bedeutsam: Erstens die Zahl der Personen und der Wert der Güter, die der Bedrohung ausgesetzt sein könnten. Zweitens das Ausmaß der Exposition dieser Personen und Güter gegenüber der Gefahr und drittens die Anfälligkeit (Vulnerabilität) der betroffenen Individuen und Objekte gegenüber der Bedrohung. Die Bandbreite der gefährdeten Objekte ist weitreichend und umfasst Menschen, Tiere, bauliche Strukturen, Infrastruktur, wirtschaftlich bedeutsame oder weitreichende Gegenstände, natürliche Ressourcen oder kulturelles Erbe. Diese Objekte besitzen nicht nur einen wirtschaftlichen, sondern auch ökologischen und sozialen Wert. Der Ausfall oder die Beschädigung dieser Güter führt häufig zu erheblichen Sekundärschäden (vgl. UFAM, 2023).

In folgender Abbildung wird der Zusammenhang der Begriffe Gefahr, Risiko und Schadenpotential dargestellt.

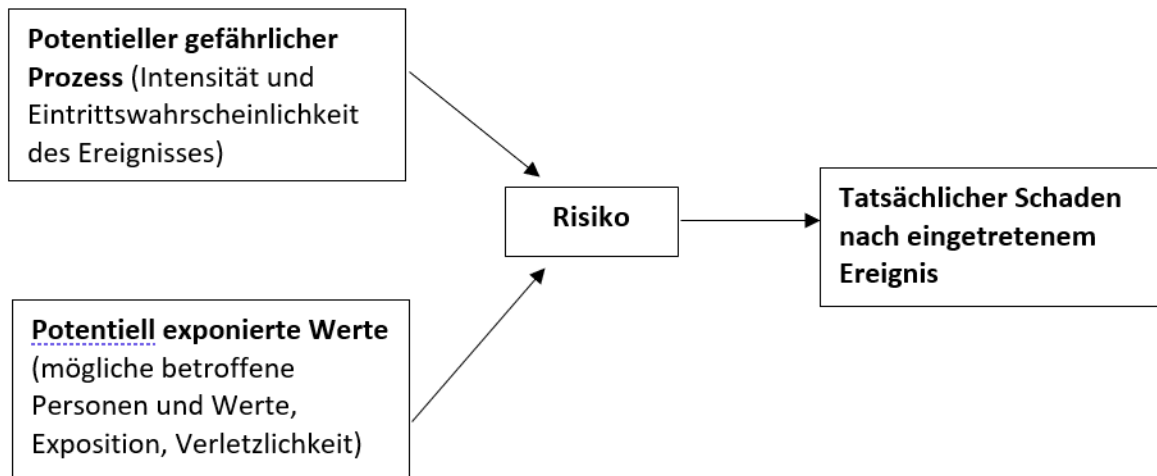


Abbildung 2: Zusammenhang der Begriffe Gefahr, Schadenpotential und Risiko; (Datengrundlage: Kienholz, 2005, S. 5)

Analyse und Bewertung von Naturgefahren

Bevor man mit einer Analyse von Gefahren und Risiken beginnt, muss man genau festlegen, was man untersuchen will. Dabei geht es darum, Grenzen zu bestimmen – wo und über welchen Zeitraum man schaut und wie tief man in die Details einsteigt. Die Analyse und Bewertung von Naturgefahren ist dementsprechend in einem räumlich und zeitlich definierten System zu betrachten. Grundsätzlich zielt eine Analyse darauf ab, was theoretisch passieren könnte. Bei der Gefahrenanalyse von Naturgefahren stellt man sich die Frage „*Welche Naturgefahren gibt es?*“. Bei der Untersuchung von Gefahren konzentriert man sich auf natürliche Ereignisse, wie zum Beispiel Lawinen, und deren mögliche Auswirkungen. Mithilfe von naturwissenschaftlichen und technischen Untersuchungen prüft man die Art, Intensität, Ausbreitung und Häufigkeit der natürlichen Prozesse. Zusätzlich werden die entsprechenden Schutzmaßnahmen auf ihre Wirksamkeit überprüft. Die Untersuchungen werden von Expertenteams durchgeführt. Die Risikoanalyse erweitert das Untersuchungsfeld der Gefahrenanalyse. Bei der Risikoanalyse geht es darum, wie wahrscheinlich Schäden der Prozesse sind und wie groß sie ausfallen könnten („*Mit welcher Wahrscheinlichkeit können durch die Naturgefahren welche Schäden entstehen?*“). Experten oder Teams aus verschiedenen Fachrichtungen führen diese Analysen mit wissenschaftlichen Methoden durch, um zuverlässige Ergebnisse zu bekommen. Auch wenn diese Ergebnisse manchmal

unsicher sein können, müssen sie so gut begründet sein, dass man sie als feste Basis für weitere Bewertungen nutzen kann (vgl. Kienholz, 2005, S. 5ff.).

Anders als die Analyse von Naturgefahren zielt die Bewertung von Naturgefahren auf die Frage „*Was darf passieren*“ ab. Dazu müssen die Gefahren und Risiken bewertet werden. Bei der Gefahrenbewertung werden die Analyseergebnisse der Gefahrenanalyse in ein spezifisches Bewertungssystem eingestuft. Zur Bewertung der Gefahren werden oft unterschiedliche Systeme herangezogen und verwendet. Dabei spielen vor allem die Parameter Intensität und Eintrittswahrscheinlichkeit der Gefahr eine entscheidende Rolle. Diese Einstufung erfolgt ebenfalls durch Expertenteams. Bei der Risikobewertung stellt man sich die Frage, welche Risiken akzeptabel sind. Diese Entscheidung hängt stark von den Personen ab, die von den Risiken betroffen sind, basierend auf ihrer eigenen Einschätzung und dem Abwägen von Nutzen und Gefahren. Wichtige Faktoren sind dabei die Lebenserfahrung und die Werte der Menschen. Oft liegt die Entscheidung darüber, was als akzeptables Risiko gilt, bei der Allgemeinheit oder wird an offizielle Stellen weitergegeben. Diese Bewertungen nehmen kulturelle Sichtweisen hinsichtlich Risiken, wirtschaftliche Überlegungen und politische Faktoren mit auf. Auch indirekte Risiken, wie zum Beispiel der Ruf eines Urlaubsortes, der durch häufige Naturkatastrophen leiden könnte, müssen berücksichtigt werden (vgl. Kienholz, 2005, S. 5ff.)

Grundlagen und Zielsetzungen der Gefahren- und Risikoanalyse

Die Bewertung von Gefahren und Risiken, speziell im Kontext von Naturereignissen, verfolgt unterschiedliche Zielsetzungen, die sich durch ihren zeitlichen Rahmen unterscheiden. Einerseits zielen sie mit einem langfristigen Blickwinkel auf die Raumplanung ab, einschließlich der Entwicklung von Siedlungsgebieten und Transportinfrastrukturen sowie der Implementierung von Schutzmaßnahmen für existierende Strukturen und der Organisation von Notfallplänen, welche auch die Ausbildung und das regelmäßige Training der Einsatzkräfte sowie die fortlaufende Information der Bevölkerung umfassen. Andererseits befassen sie sich auf einer kurz- bis mittelfristigen Basis mit Sofortmaßnahmen wie Evakuierungen oder Verkehrssperrungen bei unmittelbarer Gefahr, der Anpassung von Gewässerpegeln zur Hochwasserprävention und der Einschätzung von Lawinenrisiken durch Fachdienste oder individuelle Akteure wie Skitourengeher (vgl. Kienholz, 2005, S. 5f.).

Methodische Ansätze der Risikoanalyse

Die Internationale Organisation für Normung (ISO 31000:2009), die sich mit Risikomanagement beschäftigt, beschreibt die Beurteilung von Risiken als einen dreiteiligen Prozess. Dieser Prozess beinhaltet wie bereits zuvor beschrieben die Risikoerkennung, Risikoanalyse und Risikobewertung (vgl. Van Westen & Greiving, 2017, S. 45). Erst vor einigen Jahren wurde die Naturgefahrenanalyse durch die Naturrisikoanalyse erweitert (vgl. Elverfeldt et al., 2008, S. 35). Die Aufgabe der Risikoanalyse ist es, für das jeweilige Phänomen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens als auch das mögliche Ausmaß der Auswirkungen bzw. Schäden zu bestimmen und zu definieren. Ziel ist es, eine Bewertung bezüglich des Risikolevels zu erlangen oder die Ergebnisse in einer Risikomatrix abzubilden, um sie mit anderen Szenarien in Relation zu setzen und zu vergleichen (vgl. Bundesministerium für Inneres, 2018, S. 38f.). Die Ermittlung und Darstellung der Risiken und Eintrittswahrscheinlichkeiten von natürlichen Ereignissen und Gefahren kann auf unterschiedlichen Ebenen und für verschiedene Zwecke erfolgen (vgl. Van Westen & Greiving, 2017, S. 45). Grundsätzlich können Risikoanalysen auf globaler, nationaler, regionaler und lokaler Ebene durchgeführt werden. Je nach Ziel der Analyse, der zeitlichen und finanziellen Möglichkeiten, der Größe des Untersuchungsgebietes sowie der Verfügbarkeit der Daten muss der Maßstab ausgewählt und angepasst werden (vgl. Elverfeldt et al., 2008, S. 35).

Van Westen und Greiving (2007) unterscheiden vier Verfahren der Risikoanalyse: Die Ereignisbaumanalyse, die quantitative Risikobewertung, den Ansatz der Risikomatrix und den indikatorbasierten Ansatz. Die Ereignisbaumanalyse sowie die quantitative Risikobewertung stellen dabei quantitative Ansätze der Risikobeurteilung dar. Der Ansatz der Risikomatrix und der indikatorbasierte Ansatz sind hingegen qualitative Verfahren. Der indikatorbasierte Ansatz wird häufig auch als semi-quantitative Methode bezeichnet (vgl. Van Westen & Greiving, 2017, S. 46).

Wird die Eintrittswahrscheinlichkeit (z.B. Jährlichkeit/Wiederkehrintervalle) eines Ereignisses quantitativ ermittelt, so beruht diese Ermittlung auf statistischer Datengrundlage. Wiederkehrintervalle können mithilfe dieser Methode nur dann festgestellt werden, wenn ein Prozess oder ein Szenario mehrfach vorkommt und zudem ausreichende Daten vergangener Ereignisse vorliegen (vgl. Bundesministerium für Inneres, 2018, S. 39).

Quantitative Methoden werden vor allem bei großen Maßstäben eingesetzt. Dabei wird aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung zu bestimmten Ereignissen die Höhe des Risikos abgeleitet. Bislang wird dieser Ansatz ausschließlich auf lokalen Skalen angewendet (vgl. Van Westen & Greiving, 2017, S. 46).

Qualitative Ansätze können hingegen bei allen Maßstäben angewendet werden (vgl. Van Westen & Greiving, 2017, S. 46). Dabei werden die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Auswirkungen einer Gefahr nicht mit statistischen Daten analysiert, sondern von Expertenteams auf Grundlage von Wissen, Erfahrungen und Einschätzungen ermittelt (vgl. Bundesministerium für Inneres, 2018, S. 39). Durch diese Form der Analyse kann die räumliche Verteilung der untersuchten Prozesse dargelegt werden, indem man sich auf Karten, Luftaufnahmen, sehr detaillierten digitalen Geländemodellen und Satellitenbildern stützt. Auf internationaler beziehungsweise globaler Ebene werden die Methoden allerdings oft vereinfacht angewendet. Die Ergebnisse sind demnach teilweise weniger detailliert als bei quantitativen Verfahren. Zudem sind die Ergebnisse oft nicht eindeutig nachvollziehbar (vgl. Elverfeldt et al., 2008, S. 36).

Semi-quantitative Risikoanalysen beschreiben eine Mischung aus der qualitativen und der quantitativen Methode. Dabei werden lückenhafte Datengrundlagen durch qualitative Abschätzungen ergänzt (vgl. Bundesministerium für Inneres, 2018, S. 39).

Lokale Methoden basieren auf genauen, standortspezifischen Studien und nutzen oft Ergebnisse aus Prozessmodellen, während regionale Methoden eher allgemeine Aussagen treffen, die auf qualitativen Überlegungen oder Statistiken beruhen. Für die Raumplanung und die Gestaltung von Landnutzung sind diese allgemeineren regionalen Einsichten sehr wichtig, trotz ihrer Unsicherheiten. Denn sie erlauben es, kritische Bereiche zu identifizieren, die dann bei Bedarf genauer untersucht werden können. Die aus Gefährdungsanalysen und der Berechnung von Wahrscheinlichkeiten ermittelten Daten lassen sich in Gefahrenklassen einteilen. Diese Klassen werden auf Karten als unterschiedliche Zonen dargestellt, für die jeweils spezielle Regeln gelten. Gefahrenzonenpläne, die auf Modellen basieren, haben gegenüber solchen, die auf Expertenmeinungen beruhen, den Vorteil, dass sie transparenter, nachvollziehbarer und überprüfbarer sind. Dadurch wird die Bewertung von Gefahren objektiver (vgl. Elverfeldt et al., 2008, S. 37).

Die systematische Risikoanalyse bringt bereits einen großen Nutzen mit sich, weil sie neue Erkenntnisse liefert und Wissen weitergibt, das sonst oft verborgen bleibt. Nachdem die Risikoanalyse abgeschlossen ist, muss entschieden werden, wie auf die Ergebnisse reagiert werden soll. Basierend auf den Ergebnissen der Analyse ist es das Ziel der Risikobewertung zu entscheiden, ob das Risiko für die einzelnen Szenarien akzeptabel oder tolerierbar ist. Die Anordnung der Szenarien in einer Matrix hilft dabei zu erkennen, welche Risiken relativ am größten sind, und ermöglicht es den verschiedenen Organisationen, Prioritäten bei den Risikomanagementmaßnahmen zu setzen. Der nächste Schritt ist die Definition von Schutzziele und die Festlegung einer Akzeptanzschwelle oder eines Akzeptanzbereichs, um zu bestimmen, welche Risiken tragbar sind und welche als inakzeptabel gelten und daher verringert oder bewältigt werden müssen (vgl. Bundesministerium für Inneres, 2018, S. 47).

Die hier beschriebene Analyse und Bewertung von sogenannten Single-Hazards spielt auch für die Analyse von Multi-Hazards eine wesentliche Rolle und bildet zudem die Grundlage für das Naturgefahrenmanagement. Diese Thematik wird im Kapitel 7 genauer beschrieben.

Gefahrenkarten

Gefahrenkarten stellen Gebiete (insbesondere Siedlungen und Transportwege), die von Naturrisiken wie Hochwasser, Erdbeben, Felsstürzen und Lawinen betroffen sein könnten, dar. Diese Karten bieten auch Informationen über die Intensität der möglichen Ereignisse und deren Eintrittswahrscheinlichkeit. Für Gebiete außerhalb der bebauten Zonen weisen Gefahrenhinweiskarten mit weniger Detail auf potentielle Risikozonen hin (vgl. UFAM, 2024). Die Erstellung von Gefahrenkarten basiert auf einer umfassenden Risikobewertung. Zum fertigen Produkt zählen nicht nur die Karten, die die Risikostufen für verschiedene Gebiete visualisieren, sondern auch ein ausführlicher Bericht sowie spezielle Intensitätskarten. Diese dokumentieren, abhängig von der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens, die voraussichtliche Stärke der Naturereignisse (vgl. UFAM, 2024).

Im Rahmen der Gefahrenanalyse ist es erforderlich, die verschiedenen Gefahrenprozesse nicht isoliert, sondern auch in ihrem Zusammenspiel zu betrachten, um ein umfassendes Verständnis des gesamten Systems der einflussnehmenden Faktoren und Prozesse für einen spezifischen Ort zu erlangen. Dies beinhaltet die präzise Abgrenzung des Untersuchungsgebiets, das Verständnis historischer Prozesse durch Erfahrung und Vergleich

sowie eine detaillierte Systembewertung. Zu den Schlüsselaspekten zählen die Analyse der beteiligten Materialien, die Bewertung einflussnehmender Größen und deren Interaktion, die Energiebewertung mittels Modellberechnungen, prospektives Denken, die Identifizierung von Schwachstellen, die kritische Bewertung vorhandener Schutzmaßnahmen, die Definition relevanter Gefährdungsszenarien und die Wirkungsanalyse, gefolgt von einer Überprüfung nach Ereignissen (vgl. Kienholz, 2005, S. 9ff.).

In Österreich sind für einige Naturgefahren wie beispielsweise für Lawinen und Hochwasser flächendeckende Gefahrenkarten vorhanden. Für die Phänomene wie Rutschungen oder Felsstürze gibt es bislang meist nur Gefahrenhinweiskarten. Gefahrenhinweiskarten stellen in unterschiedlichen Maßstäben (häufig 1:20.000 – 1:25.000) eine räumliche Gefahrenanalyse grafisch dar. Diese geben allerdings keine Auskunft über die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Intensität der jeweiligen Prozesse. Gefahrenkarten hingegen bauen auf Gefahrenhinweiskarten auf und sind sehr detaillierte Karten (Maßstab 1:2000 bis 1:5000). Dabei werden unterschiedliche Gefahrenzonen mithilfe der Intensitäten und Eintrittswahrscheinlichkeiten der Phänomene bestimmt. In Österreich stellen Gefahrenzonenpläne, im Gegensatz zu Gefahrenkarten, ein durch Gesetze festgelegtes Planungswerkzeug dar, das vorhersagende Eigenschaften aufweist. Gefahrenzonenpläne zeichnen sich wie Gefahrenkarten durch eine sehr hohe Genauigkeit aus und enthalten zudem normierte Gefahrenstufen und Planzeichen. Risikokarten werden hingegen mithilfe vorangegangener Risikobewertung erstellt und geben Auskunft über flächenhafte Risikopotentiale oder genaue Risikostufen (vgl. Rudolf-Miklau, 2018, S. 216f.).

In Österreich werden die Gefahrenzonenpläne von der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) erstellt und aktualisiert. Der Gefahrenzonenplan beruht dabei auf der Rechtsgrundlage des Forstgesetzes 1975 (speziell §11). Aktuelle Naturgefahren durch Wildbäche, Lawinen, Steinschläge und Rutschungen können mithilfe des Gefahrenzonenplans visualisiert werden. Nicht nur für die Raumordnung und das Bau- und Sicherheitswesen dient der Gefahrenzonenplan als eine wichtige Grundlage, sondern auch für die entsprechende Maßnahmenplanung (vgl. BML, o. J.).

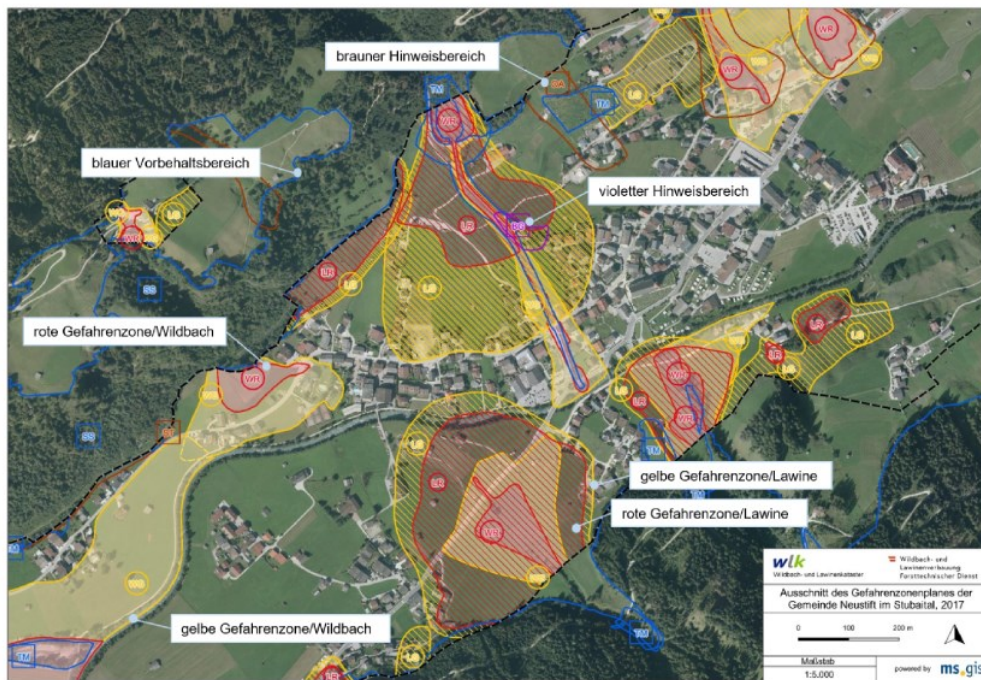


Abbildung 3: Ausschnitt des Gefahrenzonenplans der Gemeinde Neustift im Stubaital, 2017; (Quelle: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft, 2023)

In der Abbildung 3 ist ein Ausschnitt des Gefahrenzonenplans der Gemeinde Neustift im Stubaital vom Jahr 2017 zu sehen. Dabei werden Bereiche, die von Wildbächen- oder Lawinenereignissen betroffen sein können, je nach Grad und Intensität der Gefährdung in unterschiedlichen Farben markiert. Diese Gebiete verlangen demnach eine besondere Art und Weise an Bewirtschaftung oder müssen sogar freigehalten werden. Seit dem Jahr 2021 besteht auch die Option zur Visualisierung von Gebieten, die einem Risiko von Hochwasser, Erdbeben oder Lawinen mit einem Rückkehrzeitraum von 300 Jahren ausgesetzt sind oder Restrisikobereiche aufweisen. Diese Darstellungen werden nur auf Anfrage der Gemeinden erstellt und dienen als kartografische Ergänzung zu den Richtlinien für Flächenwidmung, Raumplanung, Bauprozesse und Sicherheitsaspekte (vgl. BML, 2023).

Folgende Zonen werden in Gefahrenzonenplänen der Wildbach- und Lawinenverbauung differenziert:

1. **Rote Gefahrenzone:** *„Die roten Gefahrenzonen umfassen jene Flächen, die durch Wildbäche oder Lawinen derart gefährdet sind, dass ihre ständige Benützung für Siedlungs- und Verkehrszwecke wegen der voraussichtlichen Schadenswirkungen des Bemessungsereignisses oder der Häufigkeit der Gefährdung nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich ist“.*
2. **Gelbe Gefahrenzone:** *„Die gelben Gefahrenzonen umfassen alle übrigen durch Wildbäche oder Lawinen gefährdeten Flächen, deren ständige Benützung für Siedlungs- oder Verkehrszwecke infolge dieser Gefährdung beeinträchtigt ist“.*
3. **Blauer Vorbehaltsbereich:** *„Die blauen Vorbehaltsbereiche, sind jene Bereiche, „die für die Durchführung von technischen oder forst-biologischen Maßnahmen der Dienststellen sowie für die Aufrechterhaltung der Funktionen dieser Maßnahmen benötigt werden oder zur Sicherung einer Schutzfunktion oder eines Verbauungserfolges einer besonderen Art der Bewirtschaftung bedürfen“.*
4. **Brauner Hinweisbereich:** *„Die braunen Hinweisbereiche sind jene Bereiche, bei denen aufgrund von Erhebungen festgestellt wurde, dass sie vermutlich anderen als von Wildbächen und Lawinen hervorgerufenen Naturgefahren, wie Steinschlag oder nicht im Zusammenhang mit Wildbächen oder Lawinen stehenden Rutschungen oder Erosionen, ausgesetzt sind“.*
5. **Violetter Hinweisbereich:** *„Die violetten Hinweisbereiche sind Bereiche, deren Schutzfunktion von der Erhaltung der Beschaffenheit von Boden oder Gelände abhängt“.*

(BML, 2023)

5.3 Analyse des Schadenspotentials

Bei der Analyse von Schadenspotenzialen schaut man zusätzlich, welche Objekte oder Bereiche von Naturgefahren betroffen sein könnten. Unter dem Begriff „Schadenpotential“ werden im Naturgefahrenkontext Werte bezeichnet, die potentiell von einem Naturereignis in einem festgesetzten Forschungsgebiet betroffen sein können. Dabei geht es nicht um den tatsächlichen Schaden einer Naturgefahr, sondern um die Abschätzung des maximalen Schadens, der eintreten könnte. Mithilfe von vergangenen Szenarien sowie mathematischen Modellen und geographischen Informationssystemen (GIS) kann das Schadenpotential bestimmt und berechnet werden (vgl. Rudolf-Miklau, 2009, S. 13f.).

Die Schadensbewertung schließt die Analyse des Schadenspotentials ab und dient als Basis und Weiterverarbeitung für die Risikobewertung sowie für zukünftige Schutzprojekte. Um die Auswirkungen beziehungsweise das potentielle Schadensausmaß eines Ereignisses zu bewerten, werden Schadensparameter herangezogen. Das Bundesministerium für Inneres (2018) differenziert dabei folgende Schadensparameter (Schutzgüter), die in der Bewertung des Schadens einer Naturgefahr berücksichtigt werden:

- Mensch (Todesopfer, Verletzte, psychisch Belastete, sonstige Betroffene)
- Direkte Sachschäden (u.a. Gebäude, Verkehrsinfrastruktur, Versorgungs- und Übertragungseinrichtung, Land- und Forstwirtschaft)
- Wirtschaftliche Folgeschäden (u.a. Produktions- oder Ernteauffälle, Einsatzkosten, Verlust von Arbeitsplätzen)
- Umweltschäden (z.B.: Beschädigung oder Verlust des Schutzwaldes)
- Politisch-soziale Auswirkungen (u.a. Informationsdefizite, unterschiedliche Nachrichtenlage, politische Kontroversen)

Die Schadensparameter werden mithilfe unterschiedlicher Herangehensweisen und Methoden in einem ersten Schritt für sich bewertet. Relativ eindeutig zu bewerten sind dabei Sachschäden. Schäden an Sozialgefügen sowie Umweltschäden sind hingegen oft schwer zu bewerten. Folglich werden die einzelnen Parameter zu einem Ergebnis zusammengefasst und der Schaden in eine Kategorie von 1-5 eingeordnet. Die Kategorie 5 stellt dabei die höchste

Kategorie dar und beschreibt die Situation nach einem Naturereignis als „kritisch“. Sind die Auswirkungen einer Naturgefahr so hoch, dass die Organisation gesamt in Gefahr gebracht ist oder die Organisation die Auswirkungen alleine nicht bewältigen kann, so wird diese Schadensauswirkungen in die Kategorie 5 klassifiziert. Zusätzlich können Schäden in direkte und indirekte Schäden differenziert werden. Ein direkter Schaden entsteht unmittelbar durch das Naturereignis. Ein indirekter Schaden entsteht durch die Folgen des Ereignisses und wird somit nicht vom Ereignis selbst verursacht (vgl. Rudolf-Miklau, 2009, S. 13f.; vgl. Bundesministerium für Inneres, 2018, S. 41f.).

In der Risikoanalyse unterscheidet man zwischen Einzelgefahren- („single-hazard“) und Mehrfachgefahren-Analysen („multi-hazard“). Erstere konzentriert sich auf die direkten Schäden einer Gefahrenart, während letztere mehrere Risiken und deren Wechselwirkungen (Kaskadeneffekte) berücksichtigt. Grundsätzlich bevorzugt man den Einzelgefahrenansatz, da Mehrfachgefahren-Analysen komplexer sind und umfassende Untersuchungen sowie Daten benötigen. Mit der Zeit kann jedoch eine Erweiterung zu einem Mehrfachgefahrenansatz erfolgen, was eine entsprechende Zusammensetzung des Analyseteams, unter anderem mit Wirtschaftsvertretern, erfordert. Um das potentielle Schadensausmaß bei komplexen Szenarien zu ermitteln, bei denen es zu Sekundäreffekten kommen kann, kann eine Fehlerbaumanalyse hilfreich sein. Diese berücksichtigt die in der Region vorhandenen Infrastrukturen. Eine detaillierte Betrachtung von Sekundäreffekten ist meist erst in späteren Analysedurchläufen möglich. Die Wahl des Analyseansatzes sollte zu Beginn des Projekts getroffen werden. In Österreich können dabei unterschiedliche Daten als Grundlage herangezogen werden (u.a. GZP der WLW, GZP der BWV, Einsatzdaten der Einsatzorganisationen, HORA, Schadensdokumentationen des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus, Gefahrenhinweiskarten für gravitative Massenbewegungen) (vgl. Bundesministerium für Inneres, 2018, S. 42f.).

In österreichischen Gefahrenzonenplänen und Gefahrenkarten werden für die Regionen die allgemeine Lage der Gefährdung und Betroffenheit von Naturgefahren und Naturkatastrophen dargestellt. Diese Pläne geben keine genauen Informationen darüber, welche Wirkung und Schäden ein einzelnes Ereignis haben kann. Das Schadenspotential lässt sich durch die Überlagerung von Gefahrenkarten und Gebäudeinformationen ermitteln. Grundlage für die Ermittlung von Schadenspotentialen ist die Abgrenzbarkeit von

Naturgefahren. Global kann ein Anstieg der Schäden durch Naturgefahren festgestellt werden. Dieser Trend ist auch in Österreich zu erkennen. Die Gründe für diesen Aufwärtstrend und der immer höher werdenden Schäden durch Naturgefahren und Naturkatastrophen sind vielseitig. Einerseits steigt die Siedlungs- und Nutzungsdichte in gefährdeten Regionen, so beispielsweise auch in einigen Gebieten der Alpen. Zudem kam es in den letzten Jahren zu einer Steigerung der Lebensstandards und zu einer Konzentration von Sach- und Vermögenswerten vor allem in urbanisierten Gebieten. Außerdem werden durch Naturgefahren gefährdete Flächen für Siedlungen und Bebauung freigegeben, was ebenfalls zu einer Erhöhung des Schadenspotentials führt. Durch die flächendeckende Einführung des Gefahrenzonenplanes in Österreich konnte dies allerdings eingebremst werden. In der Alpenregion ist die steigende Flächenversiegelung vor allem für touristische Einrichtungen wie Hotels, Freizeitanlagen oder Seilbahnen zu erkennen. Die Raumplanung steht daher im Spannungsfeld zweier Interessensgruppen. Einerseits geht es um den Schutz vor Naturgefahren und andererseits um die durch wirtschaftliche Interessen geleitete Raumgestaltung. Die Schutzmaßnahmen werden immer umfangreicher und dennoch wird zukünftig kein signifikanter Rückgang des Schadenspotentials zu erwarten sein (vgl. Rudolf-Miklau, 2009, S. 33–36).

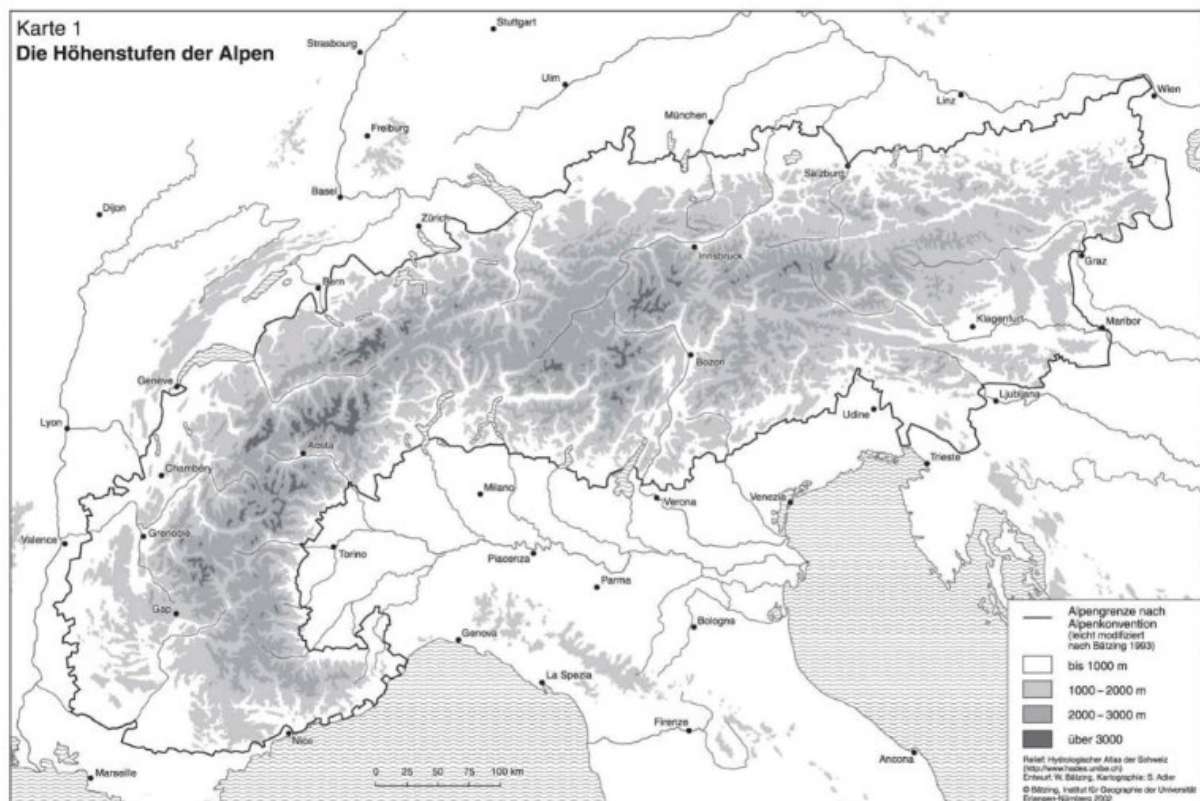
6 Alpine Multi-Hazards im österreichischen Alpenraum

Im sechsten Kapitel der Masterarbeit werden alpine Mehrfachgefahren im österreichischen Alpenraum untersucht. Dabei wird zu Beginn ein Überblick über den österreichischen Alpenraum gegeben, insbesondere im Hinblick auf die einzigartigen Herausforderungen und Risiken, die sich aus der spezifischen geografischen und klimatischen Situation der Alpen ergeben. Die Alpen dienen nicht nur als wichtige Wasser- und Energiequelle, sondern auch als Zentrum der Biodiversität und als beliebtes Erholungsgebiet. Trotz der positiven Aspekte sind die Alpen zunehmend von negativen Entwicklungen wie Umweltverschmutzung, Naturkatastrophen und dem Klimawandel betroffen. Dieses Kapitel untersucht die spezifischen Naturgefahren, die im alpinen Raum vorherrschen, wie Murgänge, Lawinen, Hochwasser und Erdbeben. Diese Gefahren werden im Kontext des Klimawandels und dessen Auswirkungen auf die Häufigkeit und Intensität solcher Ereignisse betrachtet. Besondere Aufmerksamkeit wird den Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Gefahrenarten und den daraus resultierenden Kaskadeneffekten gewidmet, um ein umfassendes Verständnis der komplexen Risikolandschaft im österreichischen Alpenraum zu entwickeln.

6.1 Der österreichische Alpenraum

Die Alpen sind verantwortlich für die Wasser- und Energieversorgung für Millionen von Menschen, sie sind ein Zentrum von Biodiversität und gelten als ein wichtiger Erholungsraum. Der Alpenraum ist aufgrund der einzigartigen Landschaft geprägt von einem enormen Sommer- sowie Wintertourismus. Allerdings werden immer mehr negative Schlagzeilen über die Alpen berichtet. Themen wie Umweltverschmutzung, Naturkatastrophen, Klimawandel, Bebauung der Täler, zunehmende Erschließung durch Verkehrswege oder unangepasster Tourismus werden im Zusammenhang mit der Alpenregion immer präsenter (vgl. Veit, 2002, S. 9f.).

Die Alpen werden in der Literatur sehr unterschiedlich abgegrenzt. Dabei gibt es enge, mittlere und sehr weite Abgrenzungen. Sehr häufig wird die mittlere Abgrenzung, also die durch die Alpenkonvention, herangezogen. In dieser Abgrenzung wird der gesamte Gebirgskörper



wird analysiert und der gesamte Lebens- und Wirtschaftsraum der Alpen wird betrachtet und somit ist eine mittlere Abgrenzung der Alpen sinnvoll (vgl. Bätzing, 2015, S. 23f.).

Zwischen 1500 und 1900 hat sich die Bevölkerung der Alpenregion fast verdreifacht, und ist von etwa 2,9 Millionen auf 7,9 Millionen Menschen angewachsen. Heutzutage zählen die Alpen zu den am meisten industrialisierten und bevölkerungsreichsten Gebirgsregionen der Welt. Allerdings ist die Bevölkerungsdichte mit einem Durchschnitt von 60 Einwohnerinnen und Einwohnern pro Quadratkilometer auf den ersten Blick eher gering. Dies ändert sich jedoch, wenn man die Konzentration der Einwohner in den Tälern berücksichtigt, was zu erheblichen regionalen Unterschieden führt: Während die Tallagen dicht besiedelt sind und teilweise städtischen Charakter annehmen, sind die Berggebiete weitgehend verlassen. Das starke Bevölkerungswachstum konzentriert sich vornehmlich auf bestimmte Orte und Städte in den Tälern, die durch Massentourismus, den Bau von Zweitwohnungen und industrielle Entwicklung geprägt sind. Im Gegensatz dazu schrumpft die Bevölkerung in den Bergregionen sowie in einigen Tallagen kontinuierlich, was die Aussagekraft der Gesamtbevölkerungszahlen mindert (vgl. Baldes, 2016, S. 22f.).

Im Jahr 2013 lebten im österreichischen Teil der Alpen 3.318.045 Menschen auf einer Fläche von 54.592 km², was eine Bevölkerungsdichte von 60,8 ergibt. Betrachtet man die Bevölkerungsdichte in Bezug auf den Dauersiedlungsraum, so ist schnell zu erkennen, dass die Bevölkerungsdichte in den Alpen (286,9 Einwohner pro km²) höher ist als in den Gebieten außerhalb der Alpen (246,0 Einwohner pro km²). Grund dafür sind die vielen unbewohnbaren Flächen der alpinen Region. Wie bereits erwähnt ist die Bevölkerungsdichte in den Alpen sehr ungleich verteilt und konzentriert sich vorwiegend auf gut erreichbare Täler. Die Alpen als Dauersiedlungsraum sowie der steigende Winter- und auch Sommertourismus gehen mit einem hohen Druck auf die Umwelt einher (vgl. Ständiges Sekretariat der Alpenkonvention, 2015, S. 17ff.).

6.2 Alpine Naturgefahren – eine Auswahl

Alpine Naturgefahren spielen sich zum Großteil in neigendem Gelände ab. In Gebirgsräumen sind Prozesse wie Murgänge, Lawinen, Hochwasser, Überschwemmungen sowie Rutsch- und Sturzbewegungen von Erd- und Felsmassen keine Seltenheit. Häufig werden die genannten Vorgänge unter dem Begriff *gravitative Massenbewegungen* zusammengefasst. Ausgenommen der Überschwemmungen kommen diese Naturgefahren vorwiegend in Gebirgsräumen, wie den Alpen, vor. Somit kann der Begriff *alpine* als *Gebirgsräume betreffend* verstanden werden (vgl. Hübl et al., 2006, S. 4). Im folgenden Kapitel werden ausgewählte alpine Naturgefahren genauer beschrieben.

6.2.1 Gravitative Massenbewegungen

Massenbewegungen stellen eine sehr große und äußerst breite Gruppe an Prozessen dar. Zu dieser Gruppe werden alle Prozesse, die an der Erdoberfläche oder in der oberflächennahen Lithosphäre ablaufen, gezählt. Häufig wird diese Prozessgruppe unter dem Terminus Hangrutschungen zusammengefasst. Allerdings stellen sogenannte Hangrutschungen nur ein Phänomen dieser Kategorie von Naturgefahren dar. Allgemein versteht man unter *gravitativen Massenbewegungen bruchlose oder bruchhafte hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fels- und/oder Lockergesteinen aufgrund der Schwerkraft*, so Dikau und Weichselgartner, 2005, S. 83. Diese Prozesse können sehr schnell beispielsweise in Form von Bergstürzen, Murgängen oder Steinschlägen ablaufen oder auch langsam in Form einer Rutschung oder Bergzerreißung (siehe Abbildung 5). Gravitative Massenbewegungen können zudem in unterschiedliche Prozessgruppen eingeteilt werden: Fallen, Kippen, Gleiten (Rutschen), Driften und Fließen (vgl. Dikau & Weichselgartner, 2005, S. 81ff.).

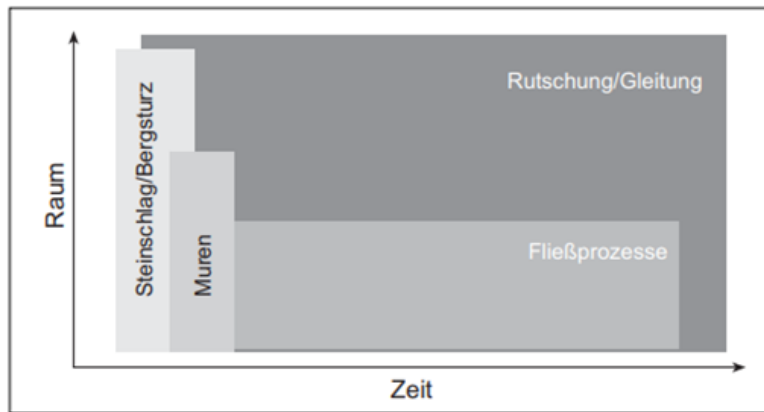


Abbildung 5: Raum-Zeit-Aspekt bei unterschiedlichen Typen gravitativer Massenbewegungen; (Quelle: Glade & Stötter, 2008, S. 153)

Massenbewegungen sind erfahrungsgemäß lokale Phänomene, die als Einzelphänomene oder aber auch in Kombination mit Erdbeben oder Vulkanausbrüchen auftreten. Die Wirkung dieser Phänomene kann hingegen über mehrere Kilometer verbreitet werden und das Schadenpotential damit sehr hoch sein. Kaum eine Region der Erde ist von Gefahren dieser Prozessgruppe nicht betroffen. Weltweit ist ein zunehmendes Auftreten von gravitativen Massenbewegungen zu erkennen. Die Gründe für die Zunahme der Ereignisse sind vielseitig. Hauptsächlich ist der Anstieg auf die massive Ausbreitung von Wohnsiedlungen in instabilen Hangregionen und in Ablagerungsgebiete zurückzuführen. Hänge sind höchst sensible Systeme, die durch natürliche Prozesse, aber auch durch menschliche Eingriffe ihre Stabilität verlieren können. Dazu gehört beispielsweise der künstliche Eingriff am Hang (Straßenbau, Bauen am Hang), natürliche Felsstürze, Bau von Infrastruktur und Verkehrswegen sowie die Entfernung der Hangvegetation durch natürlichen Waldbrand und Rodung durch den Menschen (vgl. Dikau & Weichselgartner, 2005, S. 81ff.).

Gravitative Massenbewegungen kommen nicht nur sehr häufig vor, sondern führen auch vermehrt zu hohen Sachschäden und vielen Todesopfern. Die Verletzbarkeit von Risikoelementen muss bei dieser Naturgefahrengruppen ebenfalls prozessspezifisch differenziert werden. Dabei ist bei Felsstürzen, Kippungen, schnellen Hangrutschungen und Murgängen die direkte Gefahr für uns Menschen am höchsten. Weiters können gravitative Massenbewegungen eine Gefahr für Gebäude, Verkehrswege, Vegetation, Flutwellen in natürlichen oder künstlichen Seen etc. darstellen (vgl. Dikau & Weichselgartner, 2005, S. 84f.).

Die Alpen sind ein geologisch junges Hochgebirge, in dem Massenbewegungen keine Seltenheit sind. Abbildung 6 verdeutlicht die Vielzahl der Massenbewegungen in Österreich, vor allem in der Alpenregion. Die Abbildung stammt aus der Prozessdatenbank der Geologischen Bundesanstalt. Dargestellt werden nur die erfassten Prozesse. Dabei werden die Prozesse in folgende Prozessgruppen eingeteilt: Erdfall, Gleit- und Fließprozesse, Sturzprozesse, gravitative Massenbewegungen (undefinierter Typ) und tiefgreifende Hangdeformationen (GBA MapViewer - Massenbewegungen in Österreich, 2022).

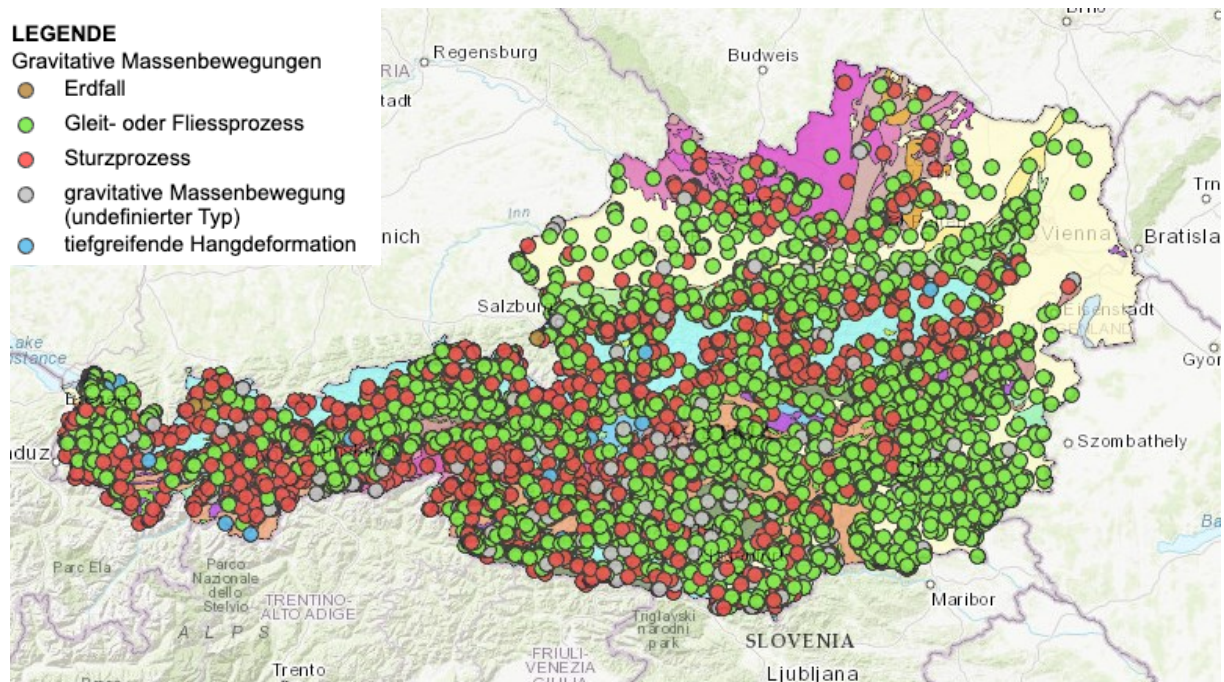


Abbildung 6: Massenbewegungen in Österreich, Auszug aus der Prozessdatenbank der Geologischen Bundesanstalt für das Gebiet Österreich; (Quelle: Map Viewer GeoSphere_Austria, 2024)

Hangrutschungen und Hangmuren

Hangrutschungen und Hangmuren sind keine seltenen Prozesse in den österreichischen Gebirgsräumen. Beide Prozesstypen finden ausschließlich in Lockergesteinen statt. Das dabei bewegte Volumen kann von einigen Kubikmetern bis zu mehreren Millionen Kubikmetern reichen. Ebenfalls kann auch die Geschwindigkeit der Prozesse zeitlich sowie räumlich sehr verschieden sein. Einige Prozesse laufen demnach sehr langsam ab, andere wiederum mit extremer Geschwindigkeit von mehreren Metern pro Sekunde. Hangrutschungen und Hangmuren werden je nach Bewegungsablauf den Prozessgruppen Driften, Gleiten, Kriechen oder Fließen zugeordnet (vgl. Glade et al., 2020, S. 461–464).

Im Zuge von regionalen Extremereignissen können gravitative Massenbewegungen im Lockergestein grob in unterschiedliche Prozesstypen beziehungsweise Prozessentwicklungsstadien eingeteilt werden: Anrisse, Translationsrutschungen und Lockergesteinsrutschungen, die in Hangmuren überlaufen können. Bei Anrissen handelt es sich um das Lösen des Lockergesteins vom Hang entlang eines Risses, wobei meist noch kein Materialtransport stattfindet (initiale Rutschung). Von einem Anriss ausgehend kann sich im Laufe eines Ereignisses spontan oder über mehrere Ereignisse progressiv eine Lockergesteinsrutschung bilden. Dabei kommt es zu einer Bewegung des Lockergesteins entlang einer oder mehrerer Gleitflächen. Daraus wiederum können Hangmuren entstehen. Das freigesetzte Material fließt auf der Geländeoberfläche ab. In Österreich kommt es aufgrund der häufigen Hochwasserereignisse immer wieder zu solchen sich progressiv weiterentwickelnden Prozessen (vgl. Glade et al., 2020, S. 461–464).

Aufgrund bisheriger regionaler Extremereignisse kann festgestellt werden, dass auf sehr engem Raum unterschiedliche Prozesstypen und – entwicklungsstadien vorkommen. Grund dafür sind einerseits die natürlichen Verhältnisse am jeweiligen Standort (geotechnische und hydro(geo)logische Eigenschaften des Lockergesteins) sowie anthropogene Einflüsse (Art der Landnutzung, Hangwasserbewirtschaftung etc.). Beispielsweise kommt es aufgrund von versiegelten Gebäuden und Siedlungsflächen zu unkontrolliertem Einleiten von Oberflächenwasser in die Hänge, was einen Einfluss auf die Wirksamkeit der direkten Prozessauslöser haben kann (vgl. Glade et al., 2020, S. 464f.).

Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren kommen in Österreich meist als Einzelprozesse vor. Dennoch können diese Prozesse an mehreren Standorten fast zeitgleich durch einen großräumigen Auslöser (z.B. Starkniederschlag) stattfinden. Neben Starkniederschlägen kann auch die Bildung von Schneeeauflagen, das Abschmelzen von Schneedecken oder Oberflächenabfluss ein Auslöser von gravitativen Lockergesteinsprozessen sein. Meist werden diese Prozesse demnach durch die Infiltration von Wasser in den Untergrund ausgelöst (vgl. Glade et al., 2020, S. 464f.).



Abbildung 7: Schematisches Blockbild einer Hangmure mit typischen Charakteristika im Gelände; (Quelle: Das geowissenschaftliche Portal für Baden-Württemberg | LGRBwissen, o. J.)

Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren als Extremereignisse können entweder als großvolumiges Einzelphänomen oder in Form von mehreren Prozessen in einer Region, welche durch einen gemeinsamen Prozessauslöser ausbrechen, stattfinden. Zusätzlich wird ein Prozess dann als Extremereignis bezeichnet, wenn dieser eine hohe Bewegungsgeschwindigkeit aufweist. Auch die realen und potentiellen Konsequenzen werden in die Einstufung miteingebunden. Allerdings kann bis dato keine detaillierte Auskunft über Extrema gegeben werden. Grund dafür sind lückenhafte beziehungsweise regional nicht einheitliche Prozessaufzeichnungen (vgl. Glade et al., 2020, S. 467).

Auch im aktuellen Bericht „Warum künftig mehr Hangrutschungen zu befürchten sind“, der im August 2023 in der Tageszeitung „Standard“ veröffentlicht wurde, wird über Hangrutschungen und Hangmuren in Österreich diskutiert. Anfangs wird der konkrete Unterschied zwischen Muren und Rutschungen verdeutlicht. Hangmuren sind eine Mischung aus Wasser und Lockergestein, wobei der Wassergehalt mindestens 40 Prozent betragen muss. Liegt der Wasseranteil bei unter 40 Prozent so spricht man von einer Hangrutschung. Bei Hangrutschungen wird das Material in der Regel um Zentimeter bis einige Meter

vertragen, teilweise sogar um 100 Meter. Hangmuren können sich erheblich weiter bewegen (vgl. Traxler, 2023).

Zudem steht in diesem Artikel die Vorhersage von Hangrutschungen und Hangmuren im Vordergrund. Im Gegensatz zu anderen Naturphänomenen wie beispielsweise Hochwasserereignissen oder Lawinen ist ein mittel- bzw. langfristiges Monitoring noch nicht etabliert. Bei Muren und Rutschungen fehlt es bis dato an diesem Monitoring, was eine Vorhersage und Frühwarnung extrem erschwert. Aufgrund des noch fehlenden flächendeckenden Monitorings ist auch eine genaue Anzahl der Geschehnisse für Österreich nicht signifikant. Ostermann betont in dem Artikel, dass man in Österreich von mehreren tausend Hangrutschungen pro Jahr sprechen kann (vgl. Traxler, 2023).

Steinschlag und Felssturz

Steinschläge und Felsstürze fallen in die Prozessgruppe des Fallens. Dabei stürzt Fels- oder Lockergestein frei fallend, springend oder rollend ab (vgl. Dikau & Weichselgartner, 2005, S. 83).

Dikau und Weichselgartner (2005) führen für den Prozesstyp Felssturz und Steinschlag folgende Risikoelemente und Verwundbarkeit an:

- Gefahr für Menschen
- Zerstörung von Gebäuden, Leitungen, Verkehrswegen und Vegetation
- Blockierung von Verkehrswegen
- Flutwelle in künstlichen und natürlichen Seen durch einstürzende Massen → Gefahr für Menschen
- Murenabgangsbildung
- Straßen- und Tunnelzerstörung
- Dammbruch durch Flutwelle

(Dikau & Weichselgartner, 2005, S. 85)

Während ein Steinschlag das Fallen, Springen und Rollen von isolierten Steinen oder Blöcken beschreibt (vgl. Kienholz et al., 1998), brechen bei Felsstürzen zusammenhängende Felsmassen ab. Diese Felsmassen spalten sich während des Abbruchs in Steine und Blöcke, die sich dann als einzelne Bruchstücke hangabwärts bewegen. Beide Sturzprozesse gehen von Felsböschungen aus. Ein Steinschlag stellt dabei einen Einzelabsturz dar. Ein Felssturz zählt zu den Massensterben (vgl. Preh et al., 2020, S. 427f.).

Extremereignisse in Bezug auf Steinschlag lassen sich anhand ihrer Magnitude (Masse und Geschwindigkeit der herabfallenden Steine oder Felsen) und der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens charakterisieren. Extremsituationen beziehen sich dabei auf die Exposition und Anfälligkeit von Personen und Infrastruktur. Als Extremsituationen werden somit Geschehnisse mit extrem hohem Schadenpotential bezeichnet. Tritt ein Extremereignis in solchen kritischen Situationen auf, kann man von einer Katastrophe sprechen (vgl. Preh et al., 2020, S. 437).

Ereignisse außergewöhnlicher Dimensionen, insbesondere hinsichtlich ihrer Größenordnung, sind solche, die das festgelegte Bemessungsereignis (Überlastfall) übertreffen. In Österreich wird das Bemessungsereignis gemäß den Vorschriften der Richtlinie für den Technischen Steinschlagschutz (ONR 24810:2017, 2017) anhand der Einwirkung eines spezifischen Bemessungsblocks festgelegt. Die Bestimmung dieses Blocks erfolgt unter Berücksichtigung einer statistischen Repräsentanz in Relation zur Häufigkeit des Ereignisses. Alle erfassten Blöcke, die größer sind als der festgelegte Bemessungsblock, werden als Extremereignisse bezeichnet. Diese herausragenden Magnituden werden gemäß ONR nicht als alleinige Grundlage für die Ausgestaltung von Schutzmaßnahmen herangezogen, da eine solche Vorgehensweise oft mit erheblichen Kosten oder technischen Einschränkungen verbunden ist. Eine uneingeschränkte Sicherheit für Personen und Infrastruktur kann somit nicht gewährleistet werden. Daher ist die Festlegung eines akzeptierten Restrisikos notwendig (vgl. Preh et al., 2020, S. 437f.).

6.2.2 Schneelawinen

Schneelawinen sind hinsichtlich des Prozessablaufes den gravitativen Massenbewegungen sehr ähnlich. Schneelawinen laufen in Fließ- bzw. Gleitprozessen ab. Das transportierte Material unterscheidet sich hier allerdings von den zuvor beschriebenen gravitativen Massenbewegungen (vgl. Glade & Stötter, 2008, S. 151).

Laut dem Forstgesetz 1975, S. 99 können Schneelawinen als Schneemassen verstanden werden, die bei raschem Absturz auf steilen Hängen, Gräben u. Ä., infolge der kinetischen Energie oder der von ihnen verursachten Luftdruckwelle oder durch ihre Ablagerung Gefahren oder Schäden verursachen können (Glade & Stötter, 2008, S. 153).

Unter einer Lawine ist der komplette Ablauf vom Anbruch bis zum Auslauf zu verstehen. Abgelagerter Schnee wird vom Anbruchgebiet Richtung Tal befördert. Dabei handelt es sich um eine Mischung aus großteils körnigen Schneeteilchen und Luft, die in einer Sturzbahn hangabwärts fällt, fließt, rutscht, kollert oder stiebt. Durch die Masse und die Geschwindigkeit, die eine Lawine mit sich bringt, kann es zu extremen Schäden kommen. Klassifiziert werden Lawinen häufig nach Volumen, Auslauflänge und Schadenspotential. Glade und Stötter (2008) differenzieren in ihrer ersten Klassifikation vier unterschiedliche Größenkategorien. Lawinen, die der Größe 4 zuzuordnen sind, haben eine Lauflänge von über 1.000 Metern und ein Volumen von mehr als 10.000 Kubikmetern. Außerdem haben Lawinen dieser Kategorie ein enormes Schadenspotential. Lawinen dieser Größe können schwere Schienenfahrzeuge und Lkws sowie größere Gebäude verschütten oder zerstören (Glade & Stötter, 2008, S. 153f.).

Komplexe Wechselbeziehungen von klimatischen Bedingungen und Geländeparametern stellen die Voraussetzung für die Bildung von Lawinen dar. Bezüglich der Entstehung von Lawinen spielen vor allem die Hangneigung, die Exposition sowie die Rauigkeit des Geländes eine entscheidende Rolle. Die meisten Lawinen brechen in Hängen, die eine Neigung zwischen 25 Grad und 45 Grad aufweisen, aus. An sehr steilen Hängen kommt es eher selten zu einer Lawine, da hier der Schnee kaum liegen bleibt. Ganz allgemein ausgedrückt können

ungünstigen Veränderungen des Stabilitätsverhältnisses als Auslöser einer Lawine gelten. Dabei spielt speziell der Schneedeckenaufbau, die Neuschneemengen, der Wind sowie die Temperatur und Sonneneinstrahlung eine entscheidende Rolle. Aber auch externe Störungen können das Phänomen der Schneelawine auslösen. Dazu zählt beispielsweise der Wildwechsel oder auch das Auslösen durch einen Skifahrer oder eine Skifahrerin (vgl. Glade & Stötter, 2008, S. 154).

Lawinen können nicht nur anhand unterschiedlicher Kriterien wie Volumen, Auslauflänge und Schadenspotential differenziert werden, sondern auch anhand der international anerkannten Lawinenklassifikation. Diese Differenzierung dient seit mehr als 20 Jahren als Grundlage zur Klassifikation von Lawinen und verdeutlicht die Vielfalt der Phänomene und die vorherrschenden unterschiedlichen Lawinentypen. Die Lawinenklassifikation schließt rein äußerliche, morphologische Merkmale mit ein, mit dem Ziel, alle zentralen Parameter von Lawinen zu bestimmen (siehe Tabelle 1) (vgl. Glade & Stötter, 2008, S. 155f.; Wieshofer et al., 2003, S. 44).

Tabelle 1: International gebräuchliche Lawinenklassifikation; (Quelle: Gubler, 1999, zitiert nach Wieshofer et al., 2003, S. 44)

Zone	Kriterium	Alternative Merkmale	
		Bezeichnung	
Anrißgebiet	Form des Anrisses:	Von einem Punkt ausgehend: Lockerschneelawine	Von einer Linie anreißend: Schneebrettlawine
	Lage der Gleitfläche:	Innerhalb der Schneedecke: Oberlawine	Auf der Bodenoberfläche: Bodenlawine
	Feuchte des Lawinenschnees:	Trocken: Trockenschneelawine	Nass: Nassschneelawine
Sturzbahn	Form der Sturzbahn:	Flächig: Flächenlawine	Runsenförmig: Runsenlawine
	Form der Bewegung:	Stiebend als Schneewolke durch die Luft: Staublawine	Fließend, dem Boden folgend: Fließlawine
Ablagerungsgebiet	Oberflächenrauigkeit der Ablagerung:	Grob: Grobe Ablagerung	Fein: Feine Ablagerung
	Feuchte der Ablagerung:	Trocken: Trockene Ablagerung	Nass: Nasse Ablagerung
	Fremdmaterial in der Ablagerung:	Fehlend: Reine Ablagerung	Vorhanden (Steine, Erde, Äste, Bäume): Gemischte Ablagerung

Der österreichische Alpenraum ist immer wieder von Lawinenkatastrophen betroffen. Infrastrukturbereiche und Siedlungsräume sind zahlreich von Fließ- und Staublawinen bedroht. Wie aus der Grafik hervorgeht, kam es in der Wintersaison 1998/1999 vergleichsweise zu sehr vielen Lawinentoten in Österreich. Der Winter 1998/1999 geht auch als der Lawinenwinter in die Geschichte von Österreich ein. Neben der hohen Anzahl an Lawinenopfern kam es zu dieser Zeit auch zu extremen Schäden an Infrastruktur und Siedlungen. Ein Grund für die erhöhten Lawinenkatastrophen in dieser Saison war der extreme Niederschlag und somit übermäßig hohen Mengen an Neuschnee in sehr kurzen Zeitperioden. Die Lawinenkatastrophe von Galtür (Tirol) am 23.02.1999 forderte mit 31 Menschen die meisten Todesopfer der Saison. Auch im Jahr 2017 kam es in Tirol zu zahlreichen Lawinenereignissen. Speziell in der kurzen Zeitperiode vom 09.03 bis 10.03.2017 kam es in

mehreren Regionen Tirols zu großflächigen Lawinenausbrüchen. Im Vergleich zum Lawinenwinter 1998/1999 war im Jahr 2017 die Lawinenaktivität höher, aufgrund der damals unterdurchschnittlichen Schneehöhe die Zahl der Lawinentoten sowie das Schadenspotential allerdings geringer (vgl. Studeregger et al., 2020, S. 518–522).

Die europäische Lawinengefahrenskala zeigt in fünf Stufen die Höhe der Lawinengefahr an. Diese Skala ist für die Öffentlichkeit zugänglich und sollte vor allem von Skifahrerinnen und Skifahren sowie anderen Wintersportlerinnen und Wintersportlern genau beachtet werden. Der Lawinenwarndienst kann die aktuelle Gefahr einer der definierten Gefahrenstufen zuordnen. Da sich die Gefahr allerdings kontinuierlich ändert, gibt es auch innerhalb einer Stufe einzelne Zwischenstufen, um eine gewisse Bandbreite zu erzeugen. Unterschiedliche Kriterien, wie die Schneedeckenstabilität, die Wahrscheinlichkeit der Lawinenauslösung, die Häufigkeit der Gefahrenstelle und die Lawinengröße, entscheiden über die Gefahrenstufe einer Region (siehe Abbildung 8) (vgl. SLF, o. J.).

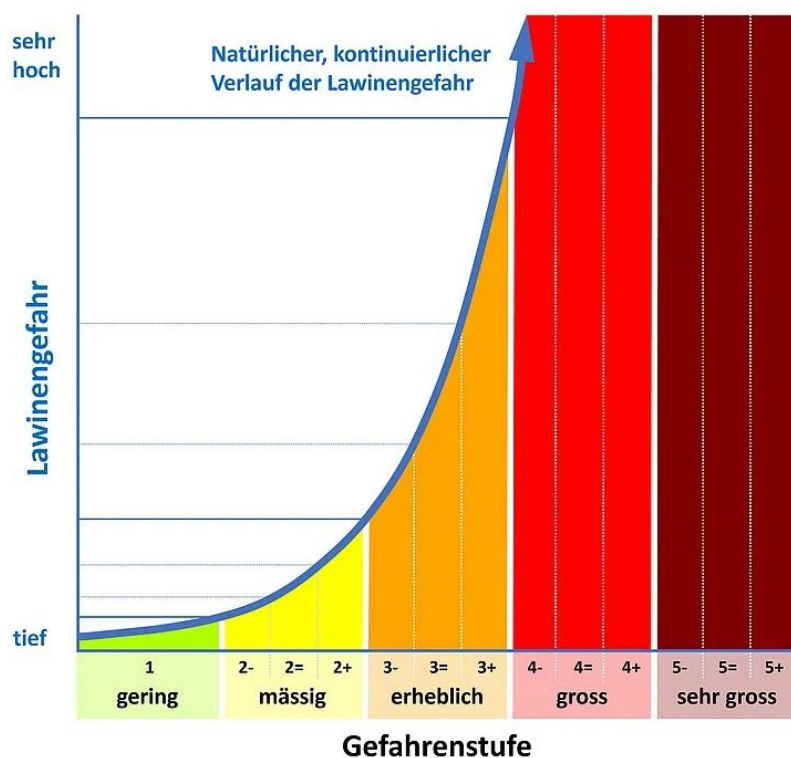


Abbildung 8: Lawinengefahrenstufen; (Quelle: SLF, o. J.)

In der folgenden Abbildung ist die aktuelle Situation der Lawinengefahrenstufen für Samstag, den 23.12.2023, im österreichischen Alpenraum dargestellt.

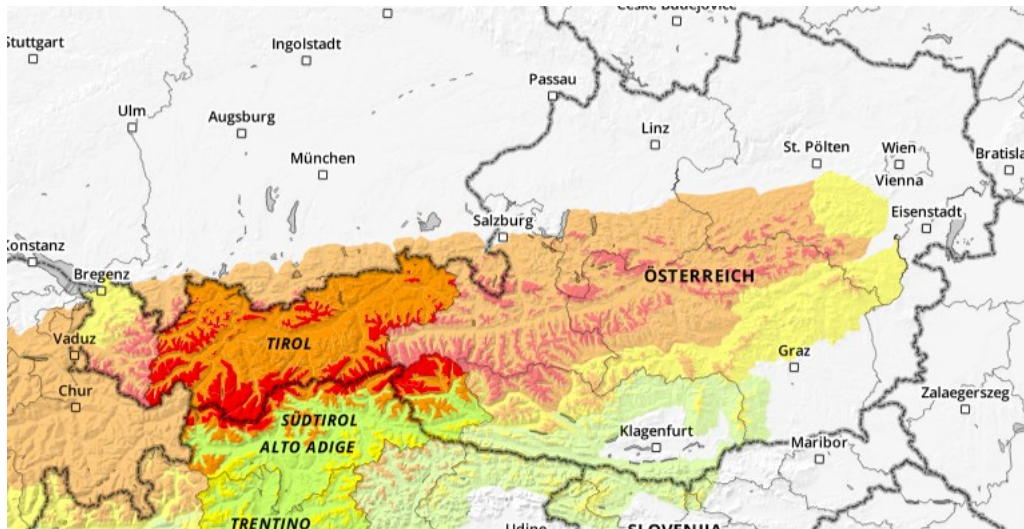


Abbildung 9: Lawinengefahrenstufen Österreichischer Alpenraum am Samstag den, 23.12.23; (Quelle: EAWS, 2023)

6.2.3 Hochwasser

Während global sehr viele Länder unter Wassermangel oder unzureichender Wasserqualität leiden, werden in weiten Teilen Mitteleuropas Hochwasserereignisse immer häufiger. Vor allem im Zusammenhang mit dem Klimawandel wird eine Zunahme an Hochwasserereignissen in unseren Breiten vorhergesagt (vgl. Bösmeier & Glaser, 2020, S. 608).

Als Hochwasser wird der Zustand in einem Gewässer bezeichnet, bei dem der Wasserstand oder Abfluss einen bestimmten (Schwellen-)Wert erreicht oder überschritten hat. Mit Hochwassern gehen oft, bedingt durch Starkniederschläge, Überschwemmungen durch oberflächlich abfließendes Wasser und Murgänge einher (Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS, 2020, S. 1).

Unterschiedliche Faktoren wie starke Schneeschmelze durch schnellen Temperaturanstieg, langanhaltender und großräumiger Niederschlag, lokaler und kurzzeitiger Starkregen sowie ungünstige Boden-, Vegetations- und Grundwasserverhältnisse können Hochwasserereignisse verursachen. Vor allem das Zusammenwirken mehrerer dieser Faktoren kann das Risiko für

ein Hochwasser erhöhen. Nicht nur die Niederschlagsmenge ist entscheidend für das Auftreten eines Hochwassers, sondern auch der Feuchtzustand der Böden. Ist der Boden bereits sehr feucht, kann nur wenig Wasser aufgenommen werden und somit weniger Niederschlag versickern. Der Feuchtzustand der Böden ist ausschlaggebend, wie gefährlich ein Hochwasser wird. Auch in Österreich ist es bereits vermehrt zu Hochwasserereignissen gekommen (vgl. BMK, o. J.; vgl. Blöschl, 2020, S. 231).

Der Landnutzungswandel gilt als Steuergröße für Hochwässer. Inwieweit sich Veränderungen in der Landnutzung auf die Entstehung von Hochwasser auswirken, kann je nach Region und anthropogenen Einfluss sehr unterschiedlich sein. Kleinräumig kann sich beispielsweise eine Ausdehnung an Siedlungsfläche auf die Oberflächenabflussbildung auswirken. Grund dafür ist die damit verbundene Flächenversiegelung und Abnahme der Infiltrationsrate. Gleichzeitig können auch natürliche Einflüsse wie intensiver Vorregen oder Bodenfrost eine Bodensättigung hervorrufen und dadurch die Gefahr für ein Hochwasser erhöhen (vgl. Bösmeier & Glaser, 2020, S. 610).

Das Hochwasserrisiko wird nach dem klassischen Ansatz als Funktion von Gefahr und Vulnerabilität bewertet. Dabei wird unter Gefahr die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses mit einer bestimmten Intensität verstanden und Vulnerabilität als die Verwundbarkeit von Menschen und Infrastruktur. Dabei setzt sich die Vulnerabilität aus dem Ausgesetztsein sowie der Anfälligkeit der Gefahr zusammen (vgl. Bösmeier & Glaser, 2020, S. 608).

Die Einordnung von Hochwasserereignissen erfolgt anhand des Parameters der „Jährlichkeit“. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Hochwasserereignisses sowie die damit verbundene Abflussmenge herangezogen. Ein hundertjähriges Hochwasserereignis (HQ 100) kommt somit durchschnittlich einmal in hundert Jahren vor. Beispielsweise findet ein fünfjähriges Donau-Hochwasser (HQ 5) mit einem Abfluss von 6.620 m³/Sekunde durchschnittlich einmal alle fünf Jahr statt (vgl. BMK, o. J.).

Im österreichischen Alpenraum konnten in den letzten Jahren einige große Hochwasserereignisse und Hochwasserkatastrophen verzeichnet werden. Ein Beispiel ist das Alpenhochwasser im August 2005, bei dem vor allem das Paznauntal sehr stark betroffen war. Allgemein kann ein Hochwasser sehr hohe Schäden anrichten, so auch das Hochwasser 2005. Auch das extreme Hochwasserereignis im Pinzgau im Jahr 2014 oder das Hochwasser im Juni

2015 im Bezirk Landeck sind Beispiele dafür, dass Hochwasserereignisse in Österreich keine Einzelfälle sind. Ein Hochwasserereignis wird meist mit einem sehr hohen Schadenpotential verbunden. Dabei kann es zu einer Schadenssumme von mehreren Millionen Euro kommen. Laut der Bundeswasserbauverwaltung Tirol (2016) kann es bei einem HQ 300 zu einem Schadenspotential von 736 Millionen Euro kommen. Neben den finanziellen Schäden kommt es bei einer Hochwasserkatastrophe meist auch zu beträchtlicher Personengefährdung, Verkehrseinschränkung und Umweltbelastung beispielsweise durch eine Verunreinigung des Grundwassers (vgl. Blöschl, 2020, S. 229f.).

In der folgenden Abbildung werden die 100-jährigen Hochwasserabflüsse in Österreich dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass am nördlichen Rand der Alpen die Hochwasserabflüsse besonders hoch sind. Eine hohe Bodenfeuchte sowie topographische Faktoren können hier zu sehr großen Hochwässern führen. Im südlichen Nordtirol hingegen sind die Abflüsse geringer. Die Region ist aufgrund der Gebirge mehr geschützt und dadurch sind auch weniger Niederschläge in den Einzugsgebieten zu verzeichnen (vgl. Blöschl, 2020, S. 232).

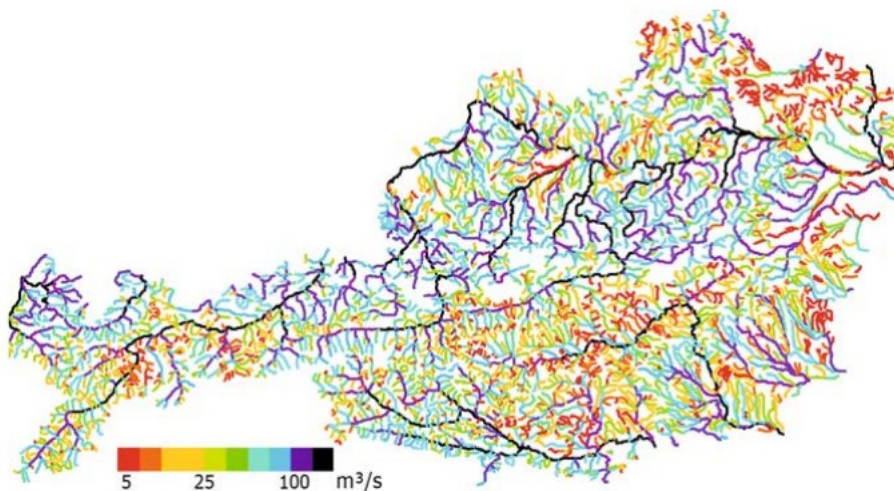


Abbildung 10: 100-jährige Hochwasserabflüsse in Österreich; (Quelle: Merz et al., 2008, zitiert nach Blöschl, 2020, S. 232)

Inwieweit Hochwässer in Österreich zunehmen werden, hängt maßgeblich von drei Faktoren ab: wasserbauliche Maßnahmen, Landnutzungsänderungen und Klimawandel. Trendanalysen der letzten Jahre zeigen, dass der Hochwasserabfluss in 46% der Gebiete in Österreich angestiegen ist. Die Ursache für diese Zunahme ist primär der Anstieg der Sommerhochwasser. Nicht nur klimatisch bedingte Veränderungen beeinflussen die Hochwassersituation in Österreich, sondern auch Landnutzungsänderungen. Beispielsweise

können schwere landwirtschaftliche Maschinen zu Bodenverdichtung führen, was wiederum Einfluss auf die Infiltration hat. Laut Salazar et al. (2012) haben Hochwassersimulationen ergeben, dass kleinere Hochwasserereignisse stärker von Landnutzungsveränderungen betroffen sind als Extremhochwasserereignisse. Die Abbildung 11 zeigt das Ausmaß der Einflussfaktoren Wasserbauten, Landnutzung und Klima in Abhängigkeit von der Einzugsgebietsfläche. Während bei kleinen Einzugsgebieten vor allem die Landnutzung eine entscheidende Rolle spielt sind es bei großen Einzugsgebieten die wasserbaulichen Maßnahmen. Hochwasserereignisse in kleineren Einzugsgebieten entstehen meist durch kurze, aber hochintensive Niederschläge (Infiltrationsüberschuss). Größere Einzugsgebiete können dann von einem Hochwasser betroffen sein, wenn es zu längeren Regenperioden kommt (Sättigungsüberschuss) (vgl. Blöschl, 2020, S. 231–235).

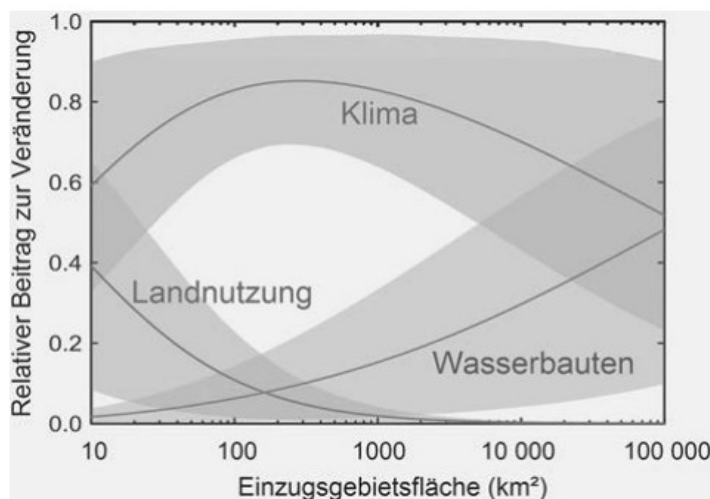


Abbildung 11: Zuordnung beobachteter Veränderungen des mittleren jährlichen Hochwassers zu den drei Einflussfaktoren: Klima, Landnutzung und wasserbauliche Maßnahmen. 97 Einzugsgebiete in Oberösterreich, Abflussdaten 1950-2012; (Quelle: Viglione et al., 2016, zitiert nach Blöschl, 2020, S. 235)

Als ein Extremereignis wird ein Hochwasser mit einem überdurchschnittlich hohen Abfluss bezeichnet, der folglich meist zu Überflutungen in Flussnähe führt. Die Jährlichkeit liegt dabei statistisch gesehen bei 100 oder mehr (vgl. Blöschl, 2020, S. 229f.).

6.3 Multi-Hazards führen zu Extremereignissen

Wie bereits im Kapitel 4.2 beschrieben, sind sogenannte Multi-Hazards Naturgefahren beziehungsweise verschiedene potentiell schadenbringende Prozesse, die sich gegenseitig beeinflussen und oft auch gegenseitig verstärken. Verstärken sich die einzelnen Prozesse stufenweise gegenseitig, so kann es schnell zu einem Extremereignis kommen (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 606).

Die Analyse von Multi-Hazards und Kaskadeneffekten im Naturgefahrenkontext stellt eine sehr große Herausforderung dar. Einerseits aufgrund unzureichender Datengrundlage vergangener Ereignisse und andererseits wegen der Uneinheitlichkeit verschiedener Naturgefahren aufgrund ihrer individuellen Prozessmerkmale. Durch die individuellen Prozessmerkmale lassen sich die jeweiligen Ereignisse nur schwer miteinander vergleichen. Auch die Erfassung und Zuweisung von konkreten Werten zu den einzelnen Parametern von Wechselwirkungen, einschließlich Kaskadeneffekten, zwischen den einzelnen Prozessen stellen eine große Schwierigkeit dar. Im Kontext von Naturgefahren werden oftmals die Parameter Eintrittswahrscheinlichkeit und Prozessintensität herangezogen, um verschiedene Gefahrenprozesse zu vergleichen. Allerdings führt die begrenzte Datengrundlage insbesondere bei Kaskadeneffekten zu erheblichen Unsicherheiten. Inwiefern unterschiedliche Naturgefahrenprozesse zusammenhängen beziehungsweise sich gegenseitig verstärken wird oft grafisch beispielsweise durch eine Interaktions-Matrix oder ein Netzwerkdiagramm dargestellt (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 607).

Aus unterschiedlichen Fallbeispielen von weltweiten Multi-Hazards und wissenschaftlicher Literatur können unterschiedliche Wechselwirkungen von Multi-Hazards identifiziert werden. Gill und Malamud (2014) teilen die Gefahreninteraktionen in vier Kategorien ein, wobei die ersten beiden Kategorien die am häufigsten diskutierten darstellen:

1. Interaktionen, bei denen eine Gefahr ausgelöst wird.

Eine Naturgefahr kann keine, eine oder mehrere weitere (sekundäre) Naturgefahren auslösen (u.a. Kappes et al. 2009). Dabei kann die sekundäre Naturgefahr vom gleichen Gefahrentyp sein wie die primäre Gefahr oder auch von einem anderen. Auch die sekundäre Gefahr kann wiederum Auslöser weiterer Gefahren sein. Kommt es zu solchen Vorgängen, wird das Gefahrenpotential einer Region deutlich erhöht. Auch das gleichzeitige Auftreten von zwei oder mehreren Gefahren kann zum Auslösen von Sekundärgefahren führen. Zudem ist es möglich, dass die Auslösung einer Sekundärgefahr die Primärgefahr verschlimmert. Dabei spricht man von einem sogenannten Rückkopplungsmechanismus (vgl. Gill & Malamud, 2014, S. 684).

2. Interaktionen, bei denen die Wahrscheinlichkeit einer Gefahr erhöht wird.

Kappes et al. (2010) erörtern die Auswirkungen, die eine Gefahr auf die Wahrscheinlichkeit der Auslösung einer anderen Gefahr haben kann. Eine Naturgefahr kann nicht nur eine weitere Gefahr auslösen, sondern auch Einfluss auf die natürliche Umgebung haben. Werden spezifische Aspekte der natürlichen Umwelt (Umweltparameter) verändert, kann das wiederum die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer weiteren Gefahr erhöhen. Beispielsweise wird durch einen Waldbrand die Vegetation eines Hanges zerstört, die maßgeblich für die Stabilität des Hanges verantwortlich ist. Dadurch muss es noch nicht zu einer weiteren Gefahr kommen, aber die Anfälligkeit des Hanges für Rutschungen nimmt zu. Dabei können Hangrutschungen durch Ereignisse wie Schneeschmelze, Regen oder Erdbeben ausgelöst werden. Ein weiteres Beispiel wäre die Bodensenkung in Verbindung mit Überschwemmungen. Regionale Bodensenkungen lösen keine Überschwemmungen aus, können aber die Anfälligkeit für diese erhöhen (vgl. Gill & Malamud, 2014, S. 684).

3. Interaktionen, bei denen die Wahrscheinlichkeit einer Gefahr verringert wird.

Eine primäre Gefahr kann die Wahrscheinlichkeit beziehungsweise das Risiko einer sekundären Gefahr verringern. Wie bereits bei der zweiten Kategorie erwähnt, kann eine Naturgefahr Einfluss auf unterschiedliche Umweltparameter haben. Dies kann dazu führen,

dass das Risiko einer bestimmten sekundären Gefahr gesenkt wird. Die Interaktionen von Gefahren können dabei kurzfristig als auch langfristig in Zusammenhang stehen. Beispielsweise würde es durch langfristige globale Abkühlung zu einer vermehrten Ansammlung von kontinentalem Eis kommen. Kommt es in weiterer Folge zu einem Vulkanausbruch unterhalb der Eisschicht, ist die Gefahr durch Aschefall und Ablagerungen wahrscheinlich verringert. Kurzfrist kann ein Starkniederschlagsereignis die Gefahr für einen Waldbrand in dieser Region senken (vgl. Gill & Malamud, 2014, S. 684f.).

4. Ereignisse, die das räumliche und zeitliche Zusammentreffen natürlicher Gefahren betreffen.

Wenn mehrere Naturgefahren gleichzeitig am selben Ort innerhalb kurzer Zeit auftreten, können ihre gemeinsamen Auswirkungen und Risiken komplexer sein als ihre Einzelrisiken addiert. Dies hängt von der Art der Gefahren und deren Größenordnung ab. Große Ereignisse wie Tsunamis können internationale Auswirkungen haben, während kleinere Ereignisse wie Erdbeben eher lokale Auswirkungen zeigen. Die Zeit, die zur Wiederherstellung oder Erholung von einem Ereignis benötigt wird, spielt ebenfalls eine Rolle. Die Überlagerung von Gefahrenereignissen kann die Anfälligkeit für nachfolgende Ereignisse erhöhen und dadurch potentiell die Auswirkungen verschärfen. Beispielsweise kann ein Erdbeben Gebäude schwächen, was sie anfälliger für weitere Schäden macht. Ebenso können Katastrophen die Verwundbarkeit von Menschen langfristig erhöhen. In einigen Fällen können sich jedoch die Auswirkungen von Gefahrenereignissen nicht über ihre Einzelrisiken hinaus erhöhen (vgl. Gill & Malamud, 2014, S. 685f.).

Neben diesen vier Kategorien von Multi-Hazards spielen auch menschliche Eingriffe sowie der Zeitrahmen der Ereignisse eine Rolle. Menschliche Eingriffe können einerseits Gefahren auslösen oder deren Wahrscheinlichkeit erhöhen. Die Auswirkungen von Gefahrenereignissen sind ebenfalls davon abhängig, wie viel Zeit für Reparaturen, Erholung und Wiederaufbau benötigt wird (vgl. Gill & Malamud, 2014, S. 686).

Darstellung von Multi-Hazards und Kaskadeneffekten – Interaktions-Matrix

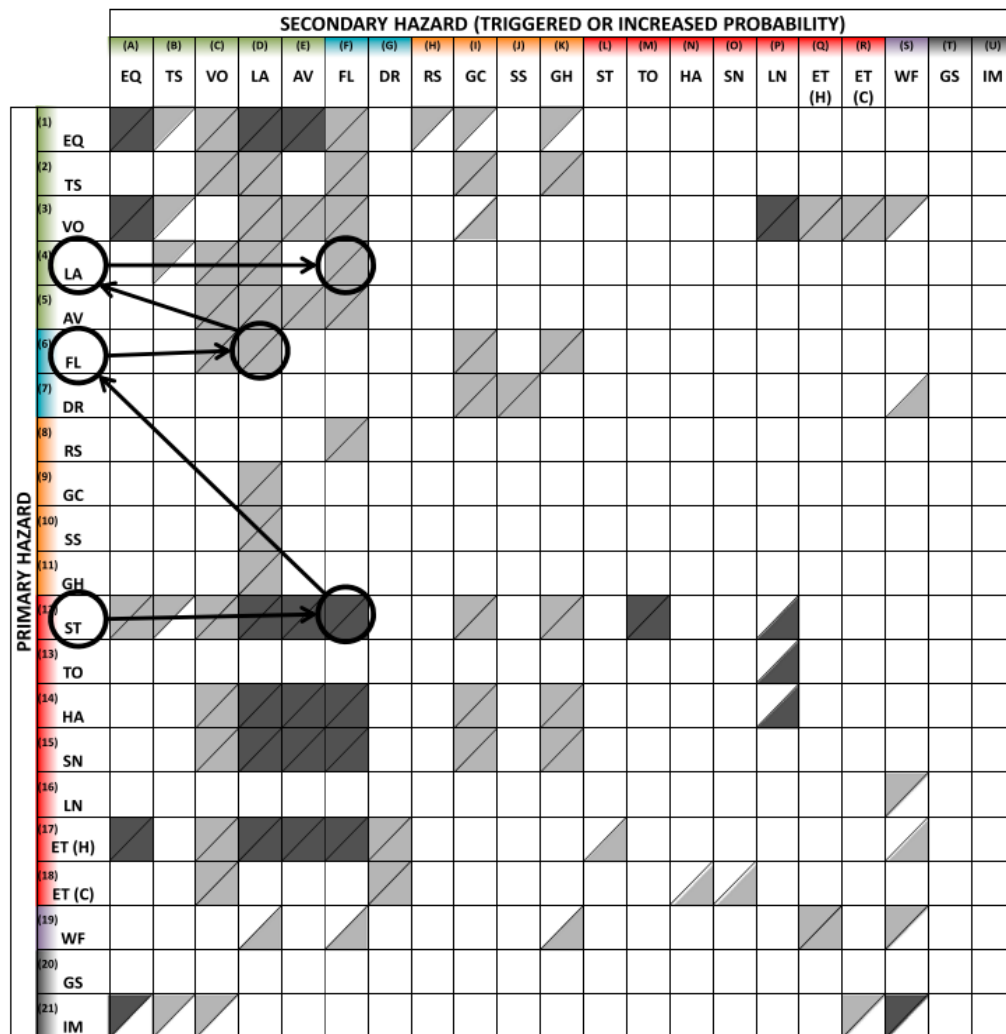


Abbildung 12: Hazard Interaction Matrix; (Quelle: Gill & Malamud, 2014, S. 694)

Tabelle 2: Erklärungen Hazard Interaction Matrix; (Quelle: Gill & Malamud, 2014, S. 694)

Farbcode	Charakter der sekundären Gefahr (Folge eines Ereignisses einer primären Gefahr)	Symbol	Erklärung
	Potential für eine geringe Anzahl an Folgegefahren (ein oder wenige Ereignisse)		Gefahr ist Auslöser einer sekundären Gefahr
	Potential für eine große Anzahl an Folgegefahren (multiple Ereignisse)		Gefahr erhöht Auftretswahrscheinlichkeit einer sekundären Gefahr
			Gefahr ist Auslöser und erhöht Auftretswahrscheinlichkeit einer sekundären Gefahr

Tabelle 3: Abkürzungen Hazard Interaction Matrix; (Quelle: Gill & Malamud, 2014, S. 694)

Gefahrengruppe (Ursache)	Gefahr	Abkürzung
Geophysikalische Naturgefahren	Earthquake (Erdbeben)	EQ
	Tsunami	TS
	Volcanic Eruption (Vulkaneruption)	VO
	Landslide (gravitative Massenbewegung)	LA
	Snow Avalanche (Schneelawine)	AV
Hydrologische Naturgefahren	Flood (Flut)	FL
	Drought (Dürre)	DR
Flachgründige Erdbewegungen	Regional Subsidence (Regionale Absenkung)	RS
	Ground Collapse (Erdsturz)	GC
	Soil (Local) Subsidence (lokale Bodenabsenkung)	SS
	Ground Heave (Hebung)	GH
Meteorologische Naturgefahren	Storm (Sturm)	ST
	Tornado	TO
	Hailstorm (Hagelsturm)	HA
	Snowstorm (Schneesturm)	SN
	Lightning (Blitzschlag)	LN
	Extreme Temperature - Hot (Hitzewelle)	ET (H)
	Extreme Temperature - Cold (Kältewelle)	ET (C)
Biophysikalische Naturgefahren	Wildfires (Waldbrand)	WF
Extraterrestrische Naturgefahren	Geomagnetic Storms (Geomagnetischer Sturm)	GS
	Impact Events (Impaktereignisse)	IM

In der hier abgebildeten Matrix von Gill und Malamud (2014) wurden für 21 Gefahren zahlreiche Interaktionsmöglichkeiten identifiziert und in grafischer Form dargestellt. Diese Matrix zeigt 90 verschiedene Wechselwirkungen zwischen natürlichen Gefahren auf, einschließlich solcher, die andere Gefahren auslösen oder deren Auftreten wahrscheinlicher machen. Für jede Gefahr wird eine Kurzform aus zwei Buchstaben verwendet (siehe Erklärungen oben). Die Matrix ordnet primäre Gefahren (die Gefahren auslösen oder deren Wahrscheinlichkeit erhöhen können) auf der vertikalen Achse und potentielle sekundäre Gefahren auf der horizontalen Achse an. Zudem sind die Gefahren in sechs Naturgefahrengruppen eingeteilt und farblich gekennzeichnet. Die Matrix verdeutlicht, wie eine primäre Gefahr eine sekundäre auslösen oder deren Wahrscheinlichkeit erhöhen kann, wobei jede Zelle zeigt, ob eine Auslösung oder eine Wahrscheinlichkeitserhöhung möglich ist.

Es wird unterschieden zwischen Situationen, in denen eine primäre Gefahr wenige oder viele Vorkommnisse einer sekundären Gefahr auslösen kann. Die Matrix berücksichtigt jedoch nicht, wie häufig solche Interaktionen auftreten (vgl. Gill & Malamud, 2014, S. 691–694).

Sie dient auch dazu, mögliche Kettenreaktionen (Kaskadeneffekte) zu identifizieren, bei denen mehrere Gefahren nacheinander ausgelöst werden können (siehe Abbildung 12). In diesem Beispiel löst ein Sturmereignis (ST) Überschwemmungen (FL) aus, die dann Erdrutsche (LA) auslösen. Diese Erdrutsche (LA) können dann weitere Überschwemmungen (FL) durch das Blockieren eines Flusses oder die Erhöhung des Sedimentgehalts im Flusssystem auslösen oder die Wahrscheinlichkeit dafür erhöhen. Diese Darstellungsweise hilft, komplexe Interaktionen zu verstehen und mögliche Präventionsstrategien zu entwickeln (vgl. Gill & Malamud, 2014, S. 691–694).

Eine weitere Darstellungsmöglichkeit von Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Naturgefahren ist in Abbildung 13 dargestellt. Dieses sogenannte Netzdiagramm wurde von Gill und Malamud (2014) entworfen und soll die Zusammenhänge und Interaktionen verdeutlichen. Gleich wie in der Interaktionsmatrix werden auch in dieser Darstellungsform die Naturgefahrenprozesse in Gruppen (geophysikalische-, hydrologische-, atmosphärische-, biophysikalische-, extraterrestrische Gefahren, flache Oberflächenprozesse) zusammengefasst und zwischen drei Kategorien der Interaktion (Auslöser, erhöhte Wahrscheinlichkeit des Auftretens, Auslöser UND erhöhte Wahrscheinlichkeit) differenziert. Zudem kann aus dieser Abbildung herausgelesen werden, dass die Phänomene Schneelawinen, gravitative Massenbewegungen, Waldbrände und Erdbeben eine weitere Gefahr desselben Gefahrentypen auslösen oder deren Auftretswahrscheinlichkeit erhöhen können (vgl. Gill & Malamud, 2014, S. 696).

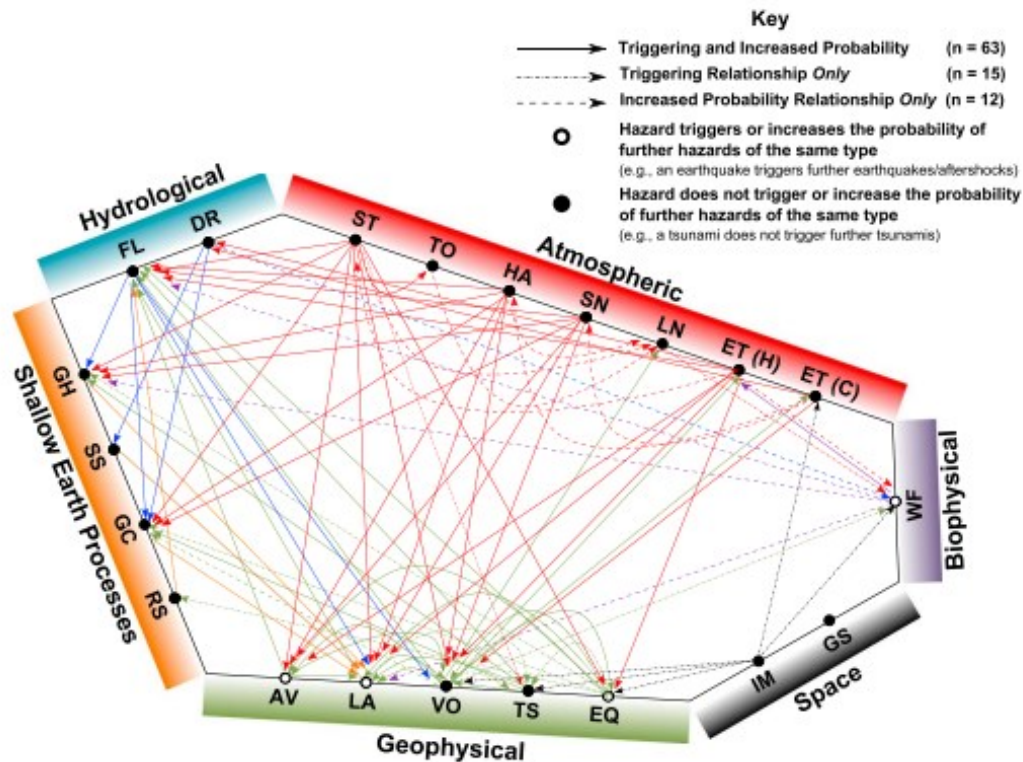


Abbildung 13: Netzdiagramm der möglichen Gefahrenartenverknüpfungen zwischen 21 Naturgefahren; (Quelle: Gill & Malamud, 2014, S. 696)

Multi-Hazards und Extremereignisse im Alpenraum

Betrachtet man Multi-Hazards auf globaler Ebene, so können zahlreiche Naturgefahren in Zusammenhang stehen und sich gegenseitig verstärken. Nachstehend werden die Prozesskombinationen beschrieben, die für den Alpenraum bedeutsam sind. Durch den Klimawandel können diese Prozesskombinationen potentiell beeinflusst werden. Die Prozesskombination wurde aus der Interaktions-Matrix von Gill und Malamud (2014) abgeleitet (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 607).

Die Untersuchung von Naturkatastrophen offenbart vielschichtige Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen verschiedenen Ereignissen und ihren Konsequenzen. Massenbewegungen, einschließlich Stürzen und Rutschungen, können signifikante Flutereignisse auslösen, die entweder durch Verdrängung in Seen oder durch den Aufstau von Fließgewässern mit nachfolgendem Ausbruch charakterisiert sind. Ebenso führen Starkregenereignisse, langanhaltende Niederschläge oder deren Kombination mit Schneeschmelze im Frühjahr zu simultanen Überschwemmungen von Flüssen und Wildbächen sowie zu einem gehäuftem Auftreten von Hangbewegungen. Diese Phänomene

tragen zur Verstärkung von Flutschäden bei, indem sie die Sedimentfracht in den betroffenen Gebieten erhöhen. Darüber hinaus kann die Schmelze von Gletschern oder das Auftauen von Permafrost zu Ausbruchsfluten führen, die als Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) bekannt sind, oder sie fördern die verstärkte Verfügbarkeit von leicht erodierbarem Lockermaterial. Winterliche Schneefall- und Sturmereignisse sind zudem prädestiniert für das gehäufte Auftreten von Schadlawinen. Dürreperioden wiederum erhöhen die Häufigkeit und Intensität von Waldbränden. Diese komplexen Interaktionen zwischen klimatischen und geophysikalischen Faktoren verdeutlichen die Notwendigkeit eines integrierten Ansatzes in der Erforschung und im Management von Naturrisiken (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 607).

Fallbeispiel – Schwarzenseebachtal

In diesem Abschnitt wird ein beispielhaftes Multi-Hazard-Ereignis aus dem Alpenraum Österreichs dargelegt, das durch Kaskadeneffekte charakterisiert ist. Im Zentrum der Betrachtung steht die Relevanz von Prozessketten für die Intensivierung der Ereignisse und die resultierenden Schäden. Das Ereignis fand am 17. Juli 2010 im Schwarzenseebachtal, Steiermark, statt, wo aufgrund der Interaktion diverser hydro-geomorphologischer Vorgänge erhebliche Schadensbilder entstanden sind. Das betroffene Einzugsgebiet des Schwarzenseebachs in den Schladminger Tauern ist geologisch durch eine Vielfalt kristalliner Gesteine gekennzeichnet und zeigt eine ausgeprägte glaziale Talmorphologie. Land- und forstwirtschaftliche Nutzungen prägen das Gebiet. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge in dem Gebiet liegt bei 1.200 mm (Höhepunkte zwischen Juni und September) und die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 5,8 Grad Celsius (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 613–616).

Das spezifische Extremereignis wurde durch Starkregen ausgelöst, der Murenabgänge, Hochwasser und erheblichen Feststofftransport nach sich zog. Es wurden 173 Schadensflächen (Flächen mit Vermurungen und/oder sonstigen Sedimentablagerungen) mit einer Gesamtfläche von etwa 151 Hektar dokumentiert, wobei die Schadenssituation an manchen Hängen durch abgestorbene Bäume durch vorangegangenen Borkenkäferbefall verschärft wurde. Während des Ereignisses bildeten sich temporäre Stauungen im Hauptgerinne des Schwarzenseebachs, die zu einem Durchbruch der Murdämme und in weiterer Folge zu einer Flutwelle führten. In mehreren Ortschaften hat die Flutwelle Überschwemmungen verursacht. Es handelte sich um ein komplexes Ereignis, bei dem

hydrologische und geomorphologische Prozesse ineinandergreifen (vgl. Pöppl & Sass, 2020, S. 613–616).

Neben den unmittelbaren durch geomorphologische Prozesse entstandenen Schäden (Vermurung oder Zerstörung von Hütten, Beschädigung von Forststraßen) waren auch menschliche Einsätze von großer Bedeutung. So wurden 60 Personen im Tal eingeschlossen und mussten in einer großangelegten Rettungsaktion evakuiert werden. Dieses Beispiel verdeutlicht die vielschichtigen Auswirkungen von Multi-Hazard-Ereignissen mit Kaskadeneffekten und wie diese zu einem Extremereignis werden (vgl. Pöppl & Sass, 2020, S. 613–616).

6.4 Klimawandel und Extremereignisse im Alpenraum

Der Klimawandel hat nicht nur Auswirkungen und Folgen für uns Menschen, sondern auch auf die Umwelt. Die Alpenregion ist ein sehr sensibles und heterogenes Ökosystem. Deshalb reagiert diese Region hochsensibel und unterschiedlich auf globale und regionale klimatische Veränderungen. Somit sind die Alpen besonders stark vom Klimawandel betroffen (vgl. GeoSphere Austria, o. J.). In den letzten 120 Jahren sind die Temperaturen im Alpenraum um ca. 2 Grad Celsius gestiegen, was nahezu doppelt so hoch ist wie der globale Durchschnitt. Für die nächsten 40 bis 50 Jahre wird aus wissenschaftlicher Sicht ein weiterer Temperaturanstieg von 2 Grad Celsius prognostiziert (vgl. Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs, 2022, S. 10).

Neben dem Anstieg der Temperatur sind im Alpenraum noch weitere klimatische Veränderungen möglich. Die Niederschlagsmengen werden in den Wintermonaten zunehmen, im Sommer hingegen abnehmen. Hitzewellen werden heißer, länger und auch häufiger vorkommen. Auch Starkniederschläge und Dürren werden intensiver. Aufgrund der zunehmenden Temperaturen werden die Gletscher immer weiter schrumpfen und der Permafrost immer mehr tauen (vgl. Maraun & Jury, 2022, S. 38).

Diese klimatischen Veränderungen beeinflussen eine Vielzahl von Sektoren und Bereichen, einschließlich Naturgefahren. Veränderungen im Klima zeigen sich durch eine Zunahme von extremen Naturereignissen. Naturgefahren können unter diesen klimatischen Veränderungen länger, intensiver und häufiger auftreten (vgl. Werthmüller, 2018, S. 11f.).

Da Klimaveränderungen eine besondere Bedeutung für die mögliche Entwicklung von Naturgefahren haben, wird in folgender Tabelle das Wahrscheinlichkeitslevel beobachteter und prognostizierter Veränderungen extremer Wetter- und Klimaereignisse dargestellt.

Tabelle 4: Wahrscheinlichkeitslevel beobachteter und prognostizierter Veränderungen extremer Wetter- und Klimaereignisse (wahrscheinlich: 66-90%; sehr wahrscheinlich: 90-99%); (Quelle: Cubasch 2002 zitiert nach Gebhardt et al., 2020, S. 281)

Phänomen	Wahrscheinlichkeitsstufe beobachteter Veränderungen (2. Hälfte 20. Jahrhundert)	Wahrscheinlichkeitsstufe prognostizierter Veränderungen (21. Jahrhundert)
Höhere Maximaltemperaturen und mehr heiße Tage in nahezu allen Landgebieten	wahrscheinlich	sehr wahrscheinlich
Höhere Minimumtemperatur, weniger kalte Tage und Frosttage in nahezu allen Landesgebieten	sehr wahrscheinlich	Sehr wahrscheinlich
Stärkere Hitze	wahrscheinlich, in vielen Gebieten	sehr wahrscheinlich, in den meisten Gebieten
Häufigere Starkregen	wahrscheinlich, in vielen Landgebieten der mittleren und höheren Breiten der Nordhalbkugel	sehr wahrscheinlich, in den meisten Gebieten
Zunahme kontinentaler Trockenheit und Dürreerisiken im Sommer	wahrscheinlich, in wenigen Gebieten	wahrscheinlich, in den meisten kontinentalen Gebieten der mittleren Breiten (Fehlen konsistenter Prognosen für andere Gebiete)
Zunahme der Windgeschwindigkeitsspitzen in Hurrikanen	in den wenigen vorliegenden Analysen noch nicht beobachtet	wahrscheinlich, in einigen Gebieten
Zunahme der mittleren und extremen Niederschlagsstärken bei Hurrikanen	noch zu wenige Daten für eine Beurteilung	wahrscheinlich, in einigen Gebieten

Wie aus der Tabelle hervorgeht und auch der IPCC (2013/2014) bestätigt, wird mit einer Zunahme von Extremwetter und Extremwitterung gerechnet. Atmosphärische Gefahren werden zunehmen (vgl. Gebhardt et al., 2020, S. 281).

Forziere et al. (2017) haben eine Studie über das Risiko wetterbedingter Gefahren für die europäische Bevölkerung durchgeführt. Dazu wurden Katastrophenaufzeichnungen mit Gefahrenprozessen und demographischen Projektionen kombiniert. Die Gefahren für die Bevölkerung wurden anhand der jährlichen Zahl der Todesfälle in 30-Jahres-Intervallen im Vergleich zum Referenzzeitraum (1981-2010) bis zum Jahr 2100 bewertet. Die Anfälligkeit der Menschen gegenüber Wetterextremen wurde bei der Studie auf der Grundlage von mehr als 2300 Datensätzen aus Katastrophendatenbanken während des Referenzzeitraumes beurteilt. Im Fokus der Studie standen Gefahren und deren Auswirkungen, wie Hitze- und Kältewellen, Waldbrände, Dürren, Fluss- und Küstenüberschwemmungen sowie Stürme. Diese Naturgefahren wurden anhand ihrer räumlichen und zeitlichen Schwankungen in Bezug auf Intensität und Häufigkeit bei einem durchschnittlichen Ausstoß von Treibhausgasemissionen analysiert. Durch die Untersuchungen in der Studie gehen Forziere et al. davon aus, dass gegen Ende des Jahrhunderts jährlich ein Drittel der europäischen Bevölkerung von Extremwetterkatastrophen betroffen sein könnten. Der Hauptgrund dafür ist der Klimawandel und somit stellen vor allem Hitzewellen eine große Bedrohung dar. Im Vergleich zum Zeitraum 1981-2010 wären die Todesfälle der europäischen Bevölkerung folglich 50 mal so hoch (vgl. Forzieri et al., 2017, S. 200).

In der folgenden Abbildung werden die Auswirkungen einzelner wetterbedingter Gefahren auf die europäische Bevölkerung veranschaulicht. Die Auswirkungen der Gefahren wurden für vier Zeitabschnitte: 1981-2010 (Referenzzeitraum), 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100, erstellt. Dabei verdeutlichen die roten Balken die Todesfälle und die blauen Balken die Exposition von Personen der jeweiligen Naturgefahr. Die Klimavariabilität zwischen den Modellen wird mittels der Fehlerbalken dargestellt. Die Prozentsätze geben die relativen Schwankungen in Bezug auf den Referenzzeitraum (1981-2010) an (vgl. Forzieri et al., 2017, S. 204).

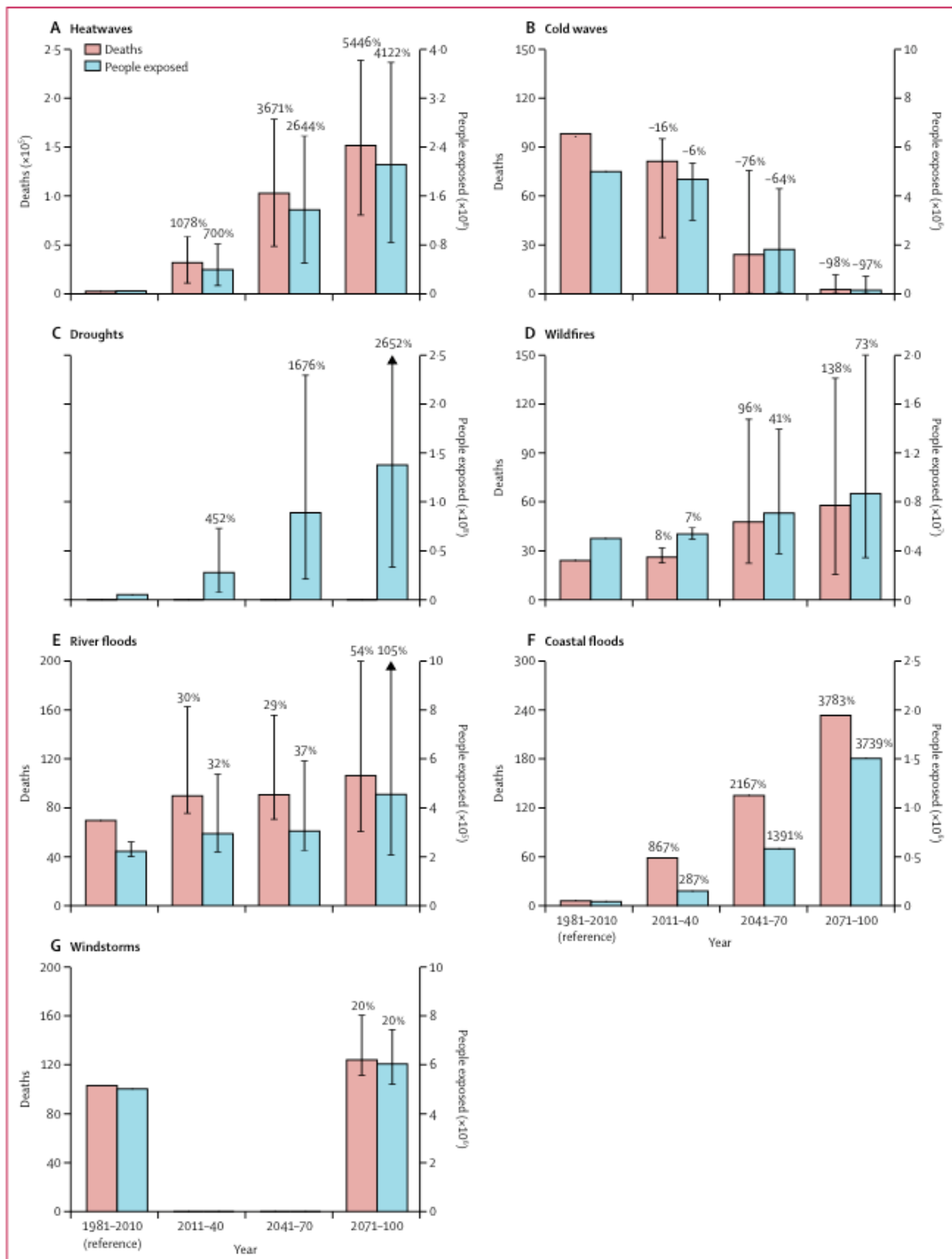


Abbildung 14: Auswirkungen einzelner wetterbedingter Gefahren auf die europäische Bevölkerung; (Quelle: Forzieri et al., 2017, S. 204)

Aus der Abbildung geht hervor, dass die bevorstehenden Auswirkungen von Naturgefahren auf das Leben der Menschen sehr unterschiedlich sind. Hitzewellen sind dabei die tödlichste wetterbedingte Naturgefahr. Allein während des Berichtszeitraums wurden in den Katastrophendatenbanken rund 2700 hitzebedingte Todesfälle pro Jahr in Europa registriert. Laut den zukünftigen Prognosen wird diese Zahl exponentiell ansteigen. Auch die Zahl der Todesfälle im Zusammenhang mit Überschwemmungen an der Küste, Flussüberschwemmungen, Waldbränden und Stürmen wird steigen. Todesfälle durch Dürren sind in Europa eher selten und wurde daher in dieser Studie nicht angeführt. Im Gegensatz zu vielen anderen Naturgefahren wird die Zahl der Todesopfer durch Kältewellen aufgrund der globalen Erwärmung zurückgehen. Die Zunahme der europäischen Bevölkerung, die intensiven Gefahren ausgesetzt ist, verläuft sehr ähnlich zu den zuvor beschriebenen Todesfällen. Die Auswirkungen können regional sehr unterschiedlichen sein und hängen zudem von der Häufigkeit und Intensität der Gefahr ab. Vor allem der Süden Europas wird in Zukunft mit Hitzewellen und längeren Hitzeperioden konfrontiert sein (vgl. Forzieri et al., 2017, S. 203f.).

Auch in Österreich werden bereits klimatische Veränderungen aufgezeichnet. *„In der vorläufigen Auswertung von 2023 war es im Tiefland Österreichs das wärmste Jahr der seit 1768 bestehenden Messreihe, gleichauf mit 2018. Auf den Bergen war es das drittwärmste Jahr in der seit 1851 bestehenden Gebirgsmessreihe“*, so Klimatologe Alexander Orlik von der GeoSphere Austria. Die Temperaturen im Jahr 2023 lagen in Österreich im Tiefland rund 2,5 Grad und auf den Bergen rund 2,2 Grad über dem Mittel im Vergleich zur Klimaperiode 1961-1990. In einigen Orten und Städten in Österreich wurden im Jahr 2023 neue regionale Rekorde der Jahresmitteltemperatur erreicht. Nicht nur die Temperaturen nehmen zu, sondern auch die Niederschlagsmenge. Gesamt gab es in Österreich im Jahr 2023 um 16% mehr Niederschlag als in einem durchschnittlich aufgezeichneten Jahr. Diese Aufzeichnungen verdeutlichen die Klimaerwärmung in Österreich und somit auch im österreichischen Alpenraum (vgl. GeoSphere Austria, 2023).

Laut Hock et al. (2019) zeigen viele Studien des Alpenraums der letzten Jahrzehnte bereits Veränderungen im Auftreten von Naturgefahren. Viele Naturgefahren werden durch klimatische Bedingungen beeinflusst oder sogar direkt durch extreme Wetterbedingungen

ausgelöst. Daher stellt sich nicht die Frage, ob der Klimawandel einen Einfluss auf Naturgefahren hat, sondern es stellt sich viel mehr die Frage, welchen Einfluss der Klimawandel auf Naturgefahren in der Alpenregion hat (vgl. Maraun & Jury, 2022, S. 39).

In welchem Zusammenhang Klimawandel und Naturgefahren stehen, lässt sich nicht ganz einfach darlegen. Dazu müssen einige Punkte beachtet werden, welche einen kausalen Zusammenhang zwischen Klimawandel und Naturgefahren erschweren. Einerseits muss berücksichtigt werden, inwiefern der Klimawandel Bedingungen beeinflusst, welche das Auftreten von Naturgefahren verändern, und andererseits, wie diese Klimaveränderungen die Naturgefahren tatsächlich beeinflussen. Daher sind reine Trendbeobachtungen oft nicht ausreichend, um einen kausalen Zusammenhang zwischen Naturgefahren und Klimawandel darstellen zu können. Zusätzlich sollten Studien durch physikalische Überlegungen oder Modellierungen ergänzt werden (vgl. Maraun & Jury, 2022, S. 39).

Genaue Klimaveränderungen unter bestimmten Szenarien von Treibhausgasemissionen, Aerosolbelastungen und Landnutzungsänderungen lassen sich in der Alpenregion noch nicht eindeutig vorhersagen. Vor allem sind Voraussagen von Extremereignissen mit sehr viel Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheiten ergeben sich aufgrund der Komplexität des Klimas in den Alpen. Das Klima in den Alpen ist der gemäßigten Zone zuzuordnen, mit stark ausgeprägten Jahreszeiten sowie unterschiedlichen Einflüssen (im Westen maritimer Einfluss, im Osten kontinentaler Einfluss und im Süden mediterraner Einfluss). Aufgrund des komplexen Reliefs der Alpen ist das Klima zudem stark höhenabhängig und gekennzeichnet durch auffällige Mikroklimata (z.B. Regenschatten, inneralpine Trockentäler) (vgl. Maraun & Jury, 2022, S. 39f.).

Extremereignisse sind überwiegend durch thermodynamische und dynamische Prozesse bestimmt. Zu den thermodynamischen Prozessen zählen alle Vorgänge, die direkt an die Temperatur gekoppelt sind (z.B. Schneeschmelze bei höheren Temperaturen). Dynamische Prozesse hingegen beschreiben die atmosphärische Zirkulation, also die Lage, Häufigkeit und Stabilität von Wetterlagen. Thermodynamische und dynamische Prozesse beeinflussen sich gegenseitig und stehen in Verbindung zueinander. Dennoch ist eine grobe Einteilung dieser beiden Prozessarten für Aussagen über Klimaveränderungen von Vorteil, da bei thermodynamischen Prozessen eindeutigere Aussagen über Klimaveränderungen getroffen

werden können als bei dynamischen Prozessen. Beispielsweise entstand die europäische Hitzewelle (August 2003) durch eine stabile, blockierende Wetterlage (dynamisch). Die hohen Temperaturen wurden dabei aufgrund des bereits sehr trockenen Bodens erreicht (thermodynamisch). Wie oft es in der Zukunft zu ähnlichen Hitzewellen kommen wird, lässt sich nicht genau sagen. Klar ist allerdings, wenn eine Hitzewelle wie die von 2003 in einigen Jahren auftreten sollte, wäre sie deutlich trockener und heißer. Auch Starkniederschläge können in Zukunft aufgrund von feuchtwarmer Luft deutlich intensiver ausfallen (vgl. Maraun & Jury, 2022, S. 41f.).

Zukünftige Klimaveränderungen im Alpenraum hängen stark vom Verhalten der Menschen ab. In der folgenden Abbildung werden Klimaveränderungen für das Ende des 21. Jahrhunderts in Österreich dargestellt. Die Änderungen werden für den Zeitraum 2071-2100 relativ zum Zeitraum 1971-2000 abgebildet. Dargestellt wird von links nach rechts die Zunahme an Hitzetagen, die Änderung des jährlichen Maximums der Tagesniederschläge sowie die Änderung des jährlichen Maximums der 5-Tagesniederschläge. Dabei wird von einem *worst-case* Szenario (RCP8.5) ausgegangen, bei dem weltweit eine Temperaturerhöhung von 4 Grad Celsius gegenüber der Gegenwart projiziert wird. Dieses Szenario könnte dann eintreten, wenn aktuelle Klimaschutzmaßnahmen nicht eingehalten werden und die CO₂-Emissionen bis 2100 deutlich steigen (vgl. Maraun & Jury, 2022, S. 43).

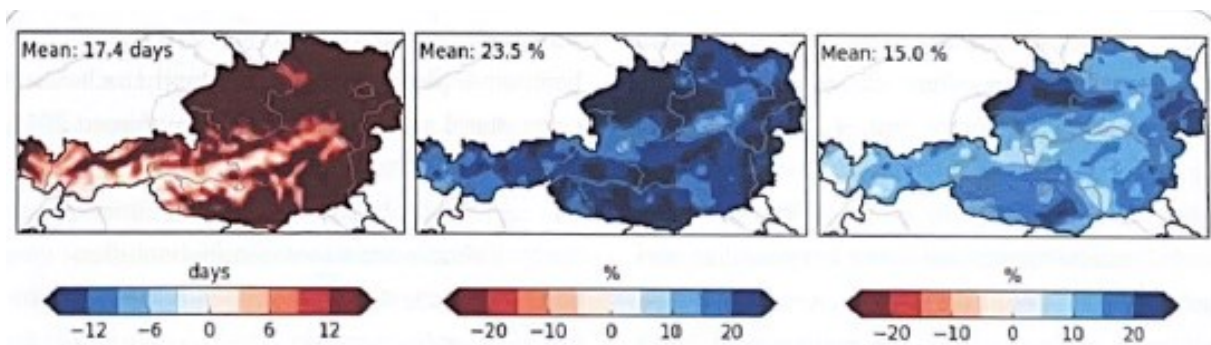


Abbildung 15: Projizierte Änderung in Hitzetagen ($T_{\max} > 30$ Grad Celsius), jährlichem Maximum der Tagesniederschläge und jährlichem Maximum der 5-Tagesniederschläge. RCP8.5, 2071-2100 relativ zu 1971-2000; (Quelle: Chimani et al., 2016 zitiert nach Maraun & Jury, 2022, S. 43)

Aus der Abbildung 15 geht hervor, dass es zukünftig in Österreich mehr Hitzetage geben wird. Zudem werden Hitzewellen häufiger, länger und auch heißer ausfallen. Auch kurze sowie langanhaltende Starkniederschläge werden häufiger und intensiver. In diesem Szenario wird vor allem in niedrigen Lagen mit einem starken Rückgang der Schneemenge gerechnet. Auch die Gletscher sowie der hochalpine Permafrost werden laut diesen Berechnungen stark schrumpfen (vgl. Maraun & Jury, 2022, S. 44).

Diese Klimaänderungen haben einen Einfluss auf alpine Naturgefahren. Einerseits können die Änderungen das Auftreten der Gefahren begünstigen und andererseits können sie ein direkter Auslöser für Naturgefahren sein. Zudem können Klimaänderungen gewisse Naturgefahren verstärken. Das Abflussverhalten von Wildbächen und Flüssen kann sich aufgrund mehrerer Faktoren ändern. Im Winter wird das Abflussverhalten hauptsächlich aufgrund der Niederschläge bestimmt, da das Gletscherschmelzwasser wegen dem allgemeinen Gletscherschwund abnehmen wird. Im Sommer hingegen wird weniger Abfluss in Wildbächen und Flüssen erwartet. Durch intensive Gewitter wird allerdings in kleinen Einzugsgebieten eine steigende Gefahr von Hochwasser und Sedimenttransport vorausgesagt. Bei größeren Alpenflüssen kann es hingegen zu einer Abnahme des Hochwasserrisikos kommen. Auch Gletscherseen, die aufgrund der klimawandelbedingten Gletscherschmelze entstehen, können Hochwasser oder Murenabgänge auslösen. Generell können Massenbewegungen wie Muren durch die steigenden Temperaturen und veränderten Niederschläge beeinflusst werden. Welchen Einfluss der Klimawandel auf Muren hat, muss je nach Kontext differenziert gesehen werden. Durch auftauenden Permafrost und Rückgang der Gletscher werden steile Hänge immer instabiler und die Gefahr von Felsstürzen und Steinschlägen wird somit erhöht. Auch Starkregenereignisse können Felsstürze begünstigen. In hochalpinen Gebirgen wird durch den Gletscherschwund Geröll freigelegt und ist gleichzeitig durch das Auftauen des Permafrostes stärkerer Erosion ausgesetzt. Durch die größere Sedimentverfügbarkeit und die intensiveren Starkniederschläge können Murenabgänge verstärkt werden. Im Sommer könnte es aufgrund abnehmender Niederschläge weniger Murenabgänge geben. Das Auftauen des Permafrostes begünstigt ebenfalls die Gefahr von tiefgründigen Hangrutschungen. Wie auch bei vielen anderen Naturgefahren hat der veränderte Niederschlag sowie landschaftliche Nutzungen (z.B. intensive Beweidung) einen Einfluss auf Hangrutschungen. Die hohen Temperaturen und somit die Abnahme der Bodenfeuchtigkeit können den starken

Niederschlägen und vermehrten Hangrutschungen entgegenwirken. Die Auswirkungen und das Zusammenspiel der Klimawandeleffekte sind jeweils stark von der Region und der Jahreszeit abhängig (vgl. Maraun & Jury, 2022, S. 44ff.).

Durch den Klimawandel verändern sich nicht nur einzelne Naturgefahren, sondern auch die Auftrittswahrscheinlichkeit vieler zusammengesetzter (compound) Ereignisse. Vor allem in den letzten Jahren wird das Zusammenspiel von Naturereignissen und Kaskadeneffekten immer genauer erforscht. Dabei kann das Zusammenspiel der Ereignisse sehr unterschiedlich sein. Für den Alpenraum erhöhen beispielsweise Waldbrände die Gefahr für Steinschläge, Muren und Hangrutschungen. Ein weiteres Beispiel ist, dass Felsstürze Gletscherseeausbrüche auslösen können. All diese Zusammenhänge von Naturereignissen sind in aktuellen Klimawandelabschätzungen kaum bis gar nicht berücksichtigt. Multi-Hazards erfordern neue Ansätze zur Planung von Klimawandelanpassungsmaßnahmen und müssen deshalb in der Forschung berücksichtigt werden (vgl. Maraun & Jury, 2022, S. 46).

Auch der IPCC (2023) bestätigt die Zunahme von zusammengesetzten und kaskadierenden Risiken. Durch den Klimawandel können Multi-Hazards komplexer und stärker werden. Im Bericht des IPCC wird dazu folgendes geschrieben:

“For any given future warming level, many climate-related risks are higher than assessed in AR5, and projected long-term impacts are up to multiple times higher than currently observed (high confidence). Risks and projected adverse impacts and related losses and damages from climate change escalate with every increment of global warming (very high confidence). Climatic and non-climatic risks will increasingly interact, creating compound and cascading risks that are more complex and difficult to manage (high confidence).”
(IPCC, 2023, S. 14)

7 Naturgefahrenmanagement

Das Management von Naturgefahren und Naturrisiken und die damit verbundene Raumplanung ist ein sehr komplexes Thema. Der Umgang mit Naturgefahren wurde im Laufe der Zeit immer weiterentwickelt und verbessert.

Die verschiedenen Stadien im Umgang mit Naturgefahren lassen sich durch den Zyklus des integralen Risikomanagements beschreiben. Das integrale Risikomanagement ist eine ganzheitliche Betrachtung von Naturgefahren und beinhaltet die Phasen Vorbeugung, Bewältigung und Regeneration mit ihren jeweiligen Maßnahmen. Ausgehend von der Gefahrenabwehr wurde das Gefahrenmanagement, das Risikomanagement und aktuell der Risiko-Governance-Ansatz weiterentwickelt. Während die Gefahrenabwehr nur die Vermeidung von Naturgefahren und ein gewisses Ausmaß an Schutz umfasst, werden im Gefahrenmanagement und im Risikomanagement komplexe Präventionsstrategien und -maßnahmen berücksichtigt. Zudem spielt im Risikomanagement auch die Vulnerabilität eine wichtige Rolle. Die Risiko-Governance hat den Risikokreislauf noch weiterentwickelt und richtet den Fokus auf die Rahmenbedingungen und Prozesse, in denen die Politik und die Bevölkerung eng zusammenarbeiten (vgl. Schindelegger, 2019, S. 19ff.).

Im Kapitel 7 wird zu Beginn auf das integrale Risikomanagement sowie auf den Risiko-Governance-Ansatz eingegangen. Anschließend wird erörtert, inwiefern Multi-Hazards im Naturgefahrenmanagement beziehungsweise bei aktuellen technischen Schutzmaßnahmen berücksichtigt werden.

7.1 Integrales Risikomanagement - Risiko Governance

Das UNDRR (2009) definiert Disaster risk management dabei folgendermaßen:

“Disaster risk management: The systematic process of using administrative directives, organizations, and operational skills and capacities to implement strategies, policies and improved coping capacities in order to lessen the adverse impacts of hazards and the possibility of disaster.” (UNDRR, 2009)

Katastrophenrisikomanagement bezieht sich auf einen geordneten Ansatz, der administrative Vorgaben, organisatorische Strukturen sowie die nötigen praktischen Fähigkeiten nutzt, um Schadensprävention, Richtlinienentwicklung und die Steigerung der allgemeinen Widerstandsfähigkeit gegenüber Katastrophen zu fördern. Ziel ist es, potentielle Schäden durch Naturereignisse und andere Gefahren zu mindern, indem vorbeugende Maßnahmen, Risikominderung und eine effektive Vorbereitung gefördert werden. Dieses Konzept erweitert das traditionelle Risikomanagement, indem es speziell auf die Herausforderungen im Umgang mit Katastrophenrisiken eingeht (vgl. UNDRR, 2017).

Der Umgang mit Naturgefahren und mit der Gefahrenabwehr dieser hat sich im Laufe der Zeit stark verändert und weiterentwickelt. Der Alpenraum ist schon seit jeher von alpinen Naturgefahren betroffen. Im Mittelalter, sogar zum Teil bis in die Neuzeit, waren die Menschen der Meinung, Naturgefahren seien eine höhere, göttliche Gewalt, denen man hilflos ausgesetzt sei. Risikoabwägung, die bewusste Wahrnehmung von Naturgefahren sowie die bewusste Wahl eines Siedlungsstandortes begleiten das Leben im alpinen Gelände schon viele Jahrhunderte. Zu Beginn der 13. Jahrhunderts wurden in Österreich erste bauliche Maßnahmen zur Prävention von Naturgefahren geschaffen, um potentielle Schäden zu verringern (vgl. Titz et al., 2016, S. 50f.).

Mit dem Anbruch der Moderne wurden neue, durch Rationalität bestimmte Denkströmungen und die Folgen verheerender Ereignisse in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts zum Auslöser dafür, sich wissenschaftlich und technisch mit den alpinen Gefahren auseinanderzusetzen. Diese Phase kennzeichnete den Startpunkt für die Entwicklung von Methoden und Materialien, die auf eine systematische Abwehr solcher Gefahren abzielten, mit dem Hauptziel, gefährliche Naturprozesse zu unterbinden und den Schutz von spezifischen Objekten zu verbessern. Auf Basis des Wildbach- und Lawinenverbauungsgesetzes wurden 1884 erste staatliche Stellen eingerichtet, was den Beginn einer zunehmenden staatlichen Regulierung im Bereich des Umgangs mit Naturgefahren darstellt, während gleichzeitig die Eigenverantwortung der betroffenen Personen abnahm. Die ursprüngliche Achtung vor den Naturgewalten verwandelte sich zunehmend in ein Verlangen nach maximaler Sicherheit. Eine lange Zeit hinweg prägten ingenieurtechnische und zunehmend auch biologische Maßnahmen den Umgang mit diesen Naturgefahren. Nach katastrophalen Lawinen im Winter 1950/51 und weiteren Ereignissen in

den 1960er Jahren, die erhebliche wirtschaftliche Schäden verursachten, begann ein Umdenken von einer reinen Fokussierung auf das Ereignis hin zu ersten planerischen Ansätzen. In den folgenden Jahrzehnten rückten risikobasierte und ökonomisch orientierte Ansätze zur Einschätzung potentieller Schäden in den Vordergrund. Diese Entwicklungen führten zu einem integrierten, interdisziplinären Ansatz im Umgang mit alpinen Naturgefahren, bei dem nicht nur das Naturereignis selbst, sondern auch seine negativen Auswirkungen betrachtet wurden. Kienholz et al. (2004) erweiterten diesen Ansatz zum sogenannten Risikomanagementkreis, der neben der Risikobeurteilung auch Präventionsmaßnahmen sowie Strategien zur Bewältigung und Regeneration nach einem Ereignis umfasst. Dieser Kreislauf sollte als kontinuierlicher Prozess verstanden werden, der idealerweise mit einer Risikobeurteilung beginnt, obwohl in der Praxis oft erst nach einem Ereignis gehandelt wird. Angesichts der technischen Grenzen und der Erkenntnis, dass ein "Nullrisiko" nicht existiert, ist derzeit ein Paradigmenwechsel zu beobachten. Diverse Anpassungsstrategien müssen entwickelt werden sowie die menschliche Raumnutzung in den Alpen überdacht und angepasst werden (vgl. Titz et al., 2016, S. 50f.).

In der folgenden Abbildung ist der Kreislauf des Integralen Risikomanagements mit den unterschiedlichen Phasen und den jeweiligen Maßnahmen dargestellt. Das Risikomanagement umfasst alle Bereiche von der Vorsorge bis hin zur Bewältigung einer Gefahr bzw. einer Katastrophe. Das Naturgefahrenmanagement ist ein komplexes und vielschichtiges System, an dem unzählige Akteure, Organisationen und Institutionen beteiligt sind, die gemeinsam für den Schutz der Bevölkerung und deren Lebensraums arbeiten. Die Sicherheit vor Naturkatastrophen zu bewahren ist heute vorrangig Aufgabe des Staates (vgl. Titz et al., 2016, S. 51f.).

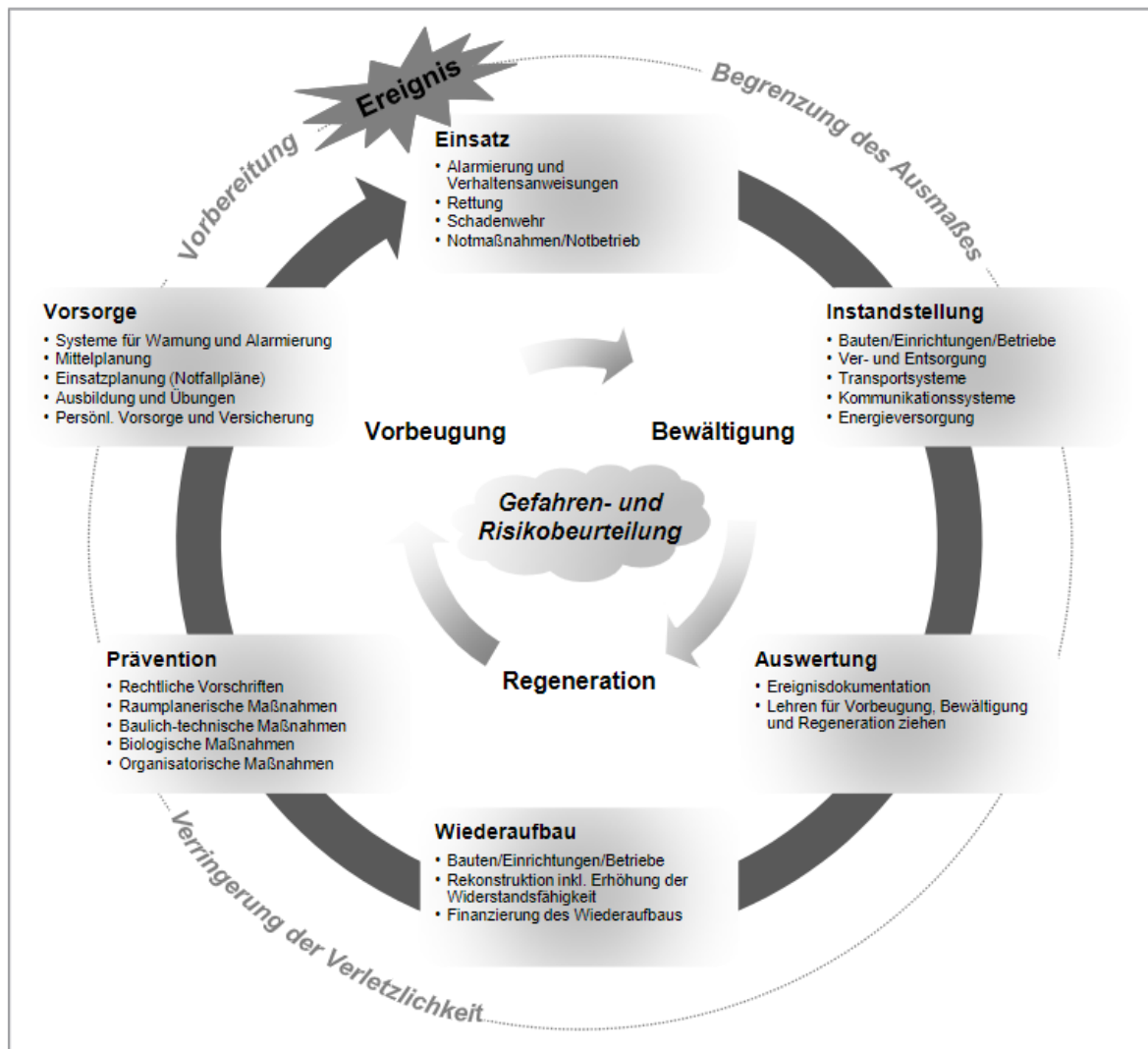


Abbildung 16: Kreislauf des Integralen Risikomanagements; (Quelle: A.Titz, verändert nach BAFU 2015 und BMLFUW 2012b zitiert nach Titz et al., 2016, S. 50)

Das Naturgefahrenmanagement entwickelt sich stetig weiter. Anfänglich von Gefahrenabwehr, später das Gefahren- und Risikomanagement, wird heute oft von dem Konzept des Risiko-Governance gesprochen. Risiko-Governance erweitert den Ansatz im Umgang mit Naturgefahren, indem es den Fokus auf die Zusammenarbeit verschiedener Akteurinnen und Akteure legt, die gemeinsam an der Lösungsfindung für Probleme oder Risiken auf verschiedenen geografischen Ebenen arbeiten. Für die Förderung solcher Prozesse könnte eine Anpassung der regulatorischen Voraussetzungen notwendig sein, allerdings lässt sich Risiko-Governance auch innerhalb der bereits bestehenden Rahmenbedingungen realisieren. Das Risiko-Governance-Konzept schließt neben der Gefahr, der Exposition und der Vulnerabilität auch noch weitere Rahmenbedingungen (Akteurinnen und Akteure sowie

Rechtsgrundlagen) und Prozesse mit ein. Bei den Prozessen geht es vor allem um die Kommunikation und die Einbindung der Bevölkerung. Ziel ist es, gemeinsam auf staatlicher und gesellschaftlicher Ebene Lösungen zu schaffen, die dann durch Gefahren- und Risikomanagementpläne umgesetzt werden können. Dieses Konzept des Dialogs ist vielseitig und erstreckt sich von lokalen Gemeinschaften bis hin zur internationalen Zusammenarbeit. Im Rahmen der Risiko-Governance sind Informationen von zentraler Bedeutung, da sie es den betroffenen Personen ermöglichen, sich eigenständig zu informieren. Auf dieser Basis können Dialoge über Risiken geführt und präventive Lösungsansätze für Gefahren entwickelt werden. In folgender Abbildung sind die Dimensionen des Risiko-Governance-Konzepts dargestellt. Zu erkennen ist die Wichtigkeit der Kommunikation zwischen Akteurinnen und Akteuren auf verschiedenen Ebenen. Menschen, die ein gemeinsames Risiko teilen, werden in den Prozess des Managements von Naturgefahren miteinbezogen. Das Konzept des Risiko-Governance ist ein sehr vielschichtiges und komplexes System im Umgang mit Naturgefahren. Aktuell stellen vor allem der Klimawandel, Kaskadenwirkungen sowie Ereignisse mit Mehrfachrisiko große Herausforderungen dar (vgl. Schindelegger, 2019, S. 20–31).



Abbildung 17: Dimensionen der Risiko-Governance; (Quelle: IRGC, 2005, zitiert nach Schindelegger, 2019, S. 22)

Der International Risk Governance Council (IRGC) beschreibt das Risk-Governance-Konzept als einen integrativen Ansatz, der die Risikoabschätzung, das Risikomanagement und die Risikokommunikation vereint. Die Einbeziehung des gesellschaftlichen Kontexts in die Risiko-Governance geht über die Berücksichtigung verschiedener Risikowahrnehmungen innerhalb unterschiedlicher Gruppen hinaus. Es ist zudem wichtig, den politischen und regulatorischen Rahmen einer Gesellschaft in einen umfassenden Ansatz der Risikobewältigung zu integrieren.

Die Verschmelzung technischer und gesellschaftlicher Blickwinkel auf Risiken kann dabei helfen, soziale Konflikte durch mehr Transparenz, Offenheit und die aktive Beteiligung der betroffenen Personen zu lösen. Laut der Definition des IRGC umfasst Risiko-Governance alle Beteiligten, Regeln, Normen, Abläufe und Mechanismen, die sich mit der Erhebung, Analyse und Weitergabe von wichtigen Risikoinformationen sowie den damit verbundenen Entscheidungsfindungen befassen. Dieser Ansatz ist besonders geeignet für Szenarien, in denen keine staatliche oder übergeordnete Autorität vorhanden ist, da er die Entscheidungen und Maßnahmen sowohl von staatlichen als auch von nicht-staatlichen Akteurinnen und Akteuren einbezieht. Risiko-Governance bewährt sich vor allem, wenn die Art des Risikos eine Abstimmung zwischen verschiedenen Beteiligten erfordert. Dieser Ansatz berücksichtigt auch die Rahmenbedingungen, wie den institutionellen und regulatorischen Kontext sowie die politische Kultur insgesamt (vgl. Sellke & Renn, 2018, S. 12f.).

7.2 Berücksichtigung alpiner Multi-Hazards im Naturgefahrenmanagement

Die Erforschung und Analyse von Multi-Hazard-Szenarien und deren Kaskadeneffekten stellt ein relativ junges Forschungsfeld dar, das sich erst in den letzten zehn bis zwanzig Jahren systematisch entwickelt hat. In der Vergangenheit lag der Schwerpunkt hauptsächlich auf der deskriptiven Dokumentation einzelner Ereignisketten, ohne tiefergehende, modellbasierte Untersuchungen dieser komplexen Interaktionen vorzunehmen. Dies hat zu einer begrenzten Wissensbasis und einer unzureichenden Datengrundlage geführt, welche die Erstellung zuverlässiger statistischer Trendanalysen und generelle Vorhersagen über zukünftige Entwicklungen im Bereich der Multi-Hazards erheblich erschwert (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 605ff.).

Besonders im österreichischen Alpenraum, einer Region, die regelmäßig von Extremereignissen heimgesucht wird, spielen solche Kaskadeneffekte eine wesentliche Rolle. Hier bieten Multi-Hazard-Risikoanalysen eine entscheidende Basis, um effektive Risikominderungsstrategien zu entwickeln und umzusetzen. Diese Strategien zielen darauf ab, Schutzmaßnahmen gezielt einzuführen und somit die mit Naturkatastrophen verbundenen Kosten zu minimieren. Trotz der offensichtlichen Notwendigkeit solcher Analysen gibt es bislang nur wenige Ansätze, die sich mit der simultanen Betrachtung verschiedener Gefahrenarten beschäftigen (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 605ff.).

Die größten Herausforderungen für diese Art der Risikoanalyse ergeben sich aus der mangelnden Verfügbarkeit von Daten über vergangene Ereignisse, der Schwierigkeit, die vielfältigen Naturgefahren aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften miteinander zu vergleichen, sowie der Komplexität bei der Erfassung und Modellierung der Wechselwirkungen und Kaskadeneffekte zwischen den verschiedenen Gefahren. Um verschiedene Gefahrenprozesse vergleichbar zu machen, werden häufig Kriterien wie Prozessintensität und Wahrscheinlichkeit des Eintretens herangezogen. Allerdings führt die dünne Datenlage, besonders bei der Betrachtung von Kaskadeneffekten, zu signifikanten Unsicherheiten (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 605ff.).

Zur Darstellung der komplexen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Naturgefahren können Instrumente wie Interaktionsmatrizen oder Netzwerkdiagramme zum Einsatz kommen (siehe Kapitel 6.3). Diese Hilfsmittel ermöglichen es, die vielschichtigen Verbindungen und die Dynamik zwischen unterschiedlichen Gefahrenprozessen zu visualisieren und besser zu verstehen, was für die Entwicklung umfassender Risikomanagementstrategien unerlässlich ist (vgl. Pöpl & Sass, 2020, S. 605ff.).

Auch Kappes et al. (2012) schildern die Herausforderungen und Schwierigkeiten, die eine Mehrfachgefahren-(Risiko-)Analyse mit sich bringt. Diese Herausforderungen umfassen die Einschätzung von Gefahrenniveaus, die Anfälligkeit gegenüber verschiedenen Naturprozessen und das daraus entstehende Risiko. Eine wirksame Minderung dieser Risiken erfordert die Berücksichtigung und Analyse aller relevanten Gefahren sowie die Entwicklung und Implementierung ganzheitlicher Ansätze zur Bewertung von Vulnerabilität und Risiko.

Eine Einschätzung des Risikos von Multi-Hazard-Ereignissen verlangt vergleichbare Einheiten wie etwa Schäden oder Verluste. Dies erfordert umfassendere Ansätze und Methoden als Einzelanalysen. Oft wird auch das Risiko von Multi-Hazards und Kaskadeneffekten im Naturgefahrenkontext unterschätzt. Grund dafür sind die dynamischen Beziehungen zwischen den einzelnen Gefahren. Diese komplexe Interaktion der Gefahren muss in den Analyseansätzen Berücksichtigung finden. Zudem ist ein tiefgehendes Verständnis für jede einzelne Naturgefahr und die Wechselwirkungen zwischen ihnen für die Analyse von Multi-Hazard-Risiken unerlässlich. Nur durch eine integrierte Betrachtungsweise, die alle potentiellen Bedrohungen einschließt, können effektive Strategien zur Risikominderung entwickelt werden (vgl. Kappes, Keiler, et al., 2012, S. 1925ff.).

Ebenfalls haben Kappes et al. (2012) aufgrund der noch sehr geringen Aufmerksamkeit für diese Thematik einen indikatorbasierten Ansatz zur Analyse von Multi-Hazards diskutiert und weiterentwickelt. Ansätze zur Bewertung der Verwundbarkeit von Multi-Hazards, die auf Indikatoren basieren, bieten den Vorteil der Anpassungsfähigkeit an diverse Gefahrensituationen sowie an die jeweils spezifischen Anforderungen. In der Arbeit von Kappes et al. wurde das PTVA-Modell (Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment) erweitert, um es auf Szenarien mit mehrfachen Gefahren anwenden zu können. Die erweiterte Multi-Hazard-Version des PTVA umfasst vier Phasen: Die Festlegung des Untersuchungsgebiets und der relevanten Bedrohungen einschließlich der Erfassung von Gefahrendaten, die Auswahl von Verwundbarkeitsindikatoren und die Datensammlung, die Gewichtung der Faktoren sowie die Verwundbarkeitsbewertung und letztendlich die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Gefahren. Die Grenzen dieses Ansatzes liegen darin, dass er nicht spezifisch auf die Intensitäten der einzelnen Gefahren ausgerichtet ist, wodurch die Verwundbarkeit eher in einer qualitativen und relativen Weise bewertet wird, und in dem umfangreichen Datenerfordernis für seine Durchführung. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht jedoch in seiner Flexibilität, die es ermöglicht, ihn sowohl für die Analyse der Verwundbarkeit in Multi-Hazard-Kontexten anzupassen als auch auf die individuellen Bedürfnisse der Nutzerinnen und Nutzer zuzuschneiden, um die Entscheidungsfindung zu erleichtern (vgl. Kappes, Papathoma-Köhle, et al., 2012, S. 577f.).

Dieser Ansatz besteht aus vier wesentlichen Phasen:

1. Ermittlung des Zielgebiets und der damit verbundenen Risiken einschließlich der Sammlung relevanter Daten über diese Naturgefahren.
2. Festlegung von Kriterien zur Beurteilung der Verwundbarkeit und Erfassung von Daten, die Aufschluss über die charakteristischen Merkmale der Regionen und Bauwerke geben, welche ihre Anfälligkeit beeinflussen könnten.
3. Beurteilung und Gewichtung der bestimmenden Faktoren für die Verwundbarkeit, wobei die besonderen Gegebenheiten und Gefährdungen des untersuchten Gebiets berücksichtigt werden.

4. Einbeziehung der Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Risiken, um zu analysieren, wie die Kombination mehrerer Gefahren die Anfälligkeit beeinflussen kann.

(vgl. Kappes, Papathoma-Köhle, et al., 2012, S. 577ff.)

Diese Vorgehensweise wurde in einem Pilotprojekt in Faucon im Tal von Barcelonnette in den südlichen französischen Alpen angewandt. Dabei wurde die Anfälligkeit von Bauwerken gegenüber Schammlawinen, oberflächennahen Rutschungen und Überschwemmungen evaluiert. Die Anwendung dieses Verfahrens lieferte nachvollziehbare Resultate, die es ermöglichten, gefährdete Gebäude zu identifizieren und die Prioritäten unterschiedlicher Stakeholder entsprechend ihren Zielsetzungen zu definieren (vgl. Kappes, Papathoma-Köhle, et al., 2012, S. 577ff.)

Terzi et al. (2019) beschäftigen sich mit unterschiedlichen Methoden zur Analyse und Bewertung von Multi-Hazards in Bergregionen. Die Methoden versuchen die komplexen Dynamiken zwischen Naturgefahren, biophysikalischen Prozessen und sozioökonomischen Systemen zu begreifen. Dabei werden fünf unterschiedliche Methoden vorgestellt, die alle die Auswirkungen und Einflüsse des Klimawandels berücksichtigen. Die Methoden haben das Ziel, die interagierenden Risiken in Bergregionen, wie beispielsweise den Alpen, in Hinblick auf den Klimawandel besser zu verstehen und damit das Risiko zu minimieren und entsprechende Klimaanpassungen zu entwickeln. Betont wird, dass einzelne Methoden nicht in der Lage sind, die Gesamtheit der Aspekte, die mit Mehrfachrisiken verbunden sind, zur Gänze zu erfassen. Daher scheint ein Ansatz, der verschiedene Techniken und Methoden verbindet, als vielversprechende Strategie für eine ganzheitliche Bewertung von Multi-Hazards und deren Risiken. Wie bereits in dieser Arbeit erwähnt, sprechen auch Terzi et al. über die Komplexität der Analyse von Multi-Hazards und betonen die Notwendigkeit weiterer Forschung und methodologischer Entwicklung. Folglich werden die fünf Methoden kurz zusammengefasst (vgl. Terzi et al., 2019, S. 759ff.).

1. Bayesian networks: Bayesian networks sind Werkzeuge, die speziell für die Analyse und den Umgang mit Wahrscheinlichkeiten und Unsicherheiten entwickelt wurden. Sie bestehen aus einer Reihe von Variablen, die in einem gerichteten, azyklischen Graphen

miteinander verbunden sind. In diesem Graphen symbolisieren Knoten die Variablen und die Kanten zeigen die Wahrscheinlichkeitsbeziehungen zwischen diesen Variablen auf. Besonders in Gebirgsregionen wird diese Methode für Risikoanalysen verwendet. Allerdings stellen vielfältige Risiken und Klimaveränderungen eine Herausforderung dar. Forschungen haben sich auf die Analyse und Bewertung von Gefahren wie Erdbeben und Hochwassern konzentriert, wobei die Modelle sowohl quantitative als auch semi-quantitative Daten berücksichtigen, um die Auswirkungen auf Menschen und Infrastrukturen zu analysieren. Das Bayesian network ist eine visuelle Methode und soll somit die Entscheidungsfindung in komplexen Situationen unterstützen. Die Form der Analyse verbindet Fachwissen und Stakeholder-Inputs. Durch die Betrachtung von mehrfachen Gefahren und deren potentiellen Verkettungen können diese Netzwerke dazu beitragen, die Auswirkungen von Klimawandel und anderen Unsicherheiten zu verstehen. Sie sind zwar standardmäßig nicht in der Lage, Rückkopplungsschleifen darzustellen, können aber durch dynamische Erweiterungen angepasst werden, um zeitliche Veränderungen zu berücksichtigen. Diese Ansätze haben in Verbindung mit geografischen Informationssystemen (GIS) die Bewertung von Naturgefahrenrisiken, wie Hochwasser und Lawinen, verbessert und ermöglichen die Einbeziehung von Anpassungsstrategien in die Modelle. Zukünftige Herausforderungen liegen in der weiteren Integration von zeitlichen und räumlichen Dynamiken sowie in der Einbindung von Feedbackschleifen, um die Modelle noch aussagekräftiger für die Anpassung an den Klimawandel zu machen. Die Förderung der Partizipation und das Engagement der Gemeinschaft können ebenfalls dazu beitragen, die Datengrundlage zu verbessern und die Anwendungsbereiche dieser Netzwerke zu erweitern (vgl. Terzi et al., 2019, S. 765).

2. Agent-based models: Agent-based models (ABMs) simulieren soziale Interaktionen und Entwicklungen, um größere Phänomene darzustellen, die aus dem Verhalten von Einzelnen entstehen. Diese Modelle setzen sich aus Agenten, ihrer Umgebung und der Zeit zusammen. Ihre Wechselwirkungen, basierend auf wissenschaftlichen Prinzipien, erzeugen komplexe Dynamiken, die über die einfache Summierung einzelner Komponenten hinausgehen. Die Modelle eignen sich besonders zur Erforschung sozialer Dynamiken und Entscheidungsfindungen in Krisensituationen. Sie

ermöglichen die Untersuchung von Verhaltensweisen, sozialen Wechselwirkungen und den Auswirkungen von Naturkatastrophen in verschiedenen Kontexten. ABMs werden verwendet, um zukünftige Mensch-Umwelt-Interaktionen unter Bedingungen des Klimawandels und wirtschaftlicher Veränderungen zu projizieren, und berücksichtigen dabei geographische Informationen für raumbezogene Analysen. Die Modelle ermöglichen auch die Bewertung von Anpassungsstrategien an Risiken und ihre Wirksamkeit innerhalb der Risikomanagementkette. Allerdings können ABMs Unsicherheiten nicht direkt erfassen, was zu einer deterministischen Interpretation führen kann. Die Herausforderung besteht darin, qualitative Daten effektiv in die Simulationen einzubinden und gleichzeitig den Umfang und die Komplexität des Modells zu managen. ABMs haben gezeigt, dass sie effektiv interdisziplinäre Daten für die Bewältigung von Klimawandelherausforderungen nutzen können. Ihre Anwendung in Gebirgsregionen steckt noch in den Kinderschuhen, doch ihr Potential, detaillierte Interaktionen zu erfassen und in umfassenden Risikoanalysen zu berücksichtigen, ist vielversprechend (vgl. Terzi et al., 2019, S. 765f.).

3. System dynamic models: Sogenannte dynamische Systemmodelle bieten Methoden, um das komplexe und nicht-lineare Verhalten von Systemen auf einer übergeordneten Ebene zu analysieren. Sie ermöglichen es, die gemeinsame Dynamik von Systemkomponenten zu untersuchen, deren Verhalten sich nicht einfach durch die Addition ihrer Einzelteile erklären lässt. Ziel ist es, zentrale Einflusspunkte im System zu identifizieren, um gezielt Veränderungen herbeiführen zu können. Bisher wurden solche Modelle nicht speziell für Risikobewertungen oder Untersuchungen in Bergregionen genutzt. Allerdings könnten die Ansätze und Erkenntnisse durchaus auf solche Gebiete übertragen werden. Ein wesentlicher Vorteil dieses Modelles ist die Darstellung von Rückkopplungsschleifen, die aufzeigen, wie sich Elemente eines Systems gegenseitig beeinflussen. Zudem helfen sie, die Komplexität und Nichtlinearität von Systemen besser zu verstehen und werden oft zur Analyse komplexer sozialer und ökologischer Systeme herangezogen. Trotzdem bedarf es weiterer Forschung, um ihre Anwendung für Risikobewertungen in Bergregionen zu vertiefen. Obwohl dynamische Systemmodelle zeitliche Veränderungen gut abbilden, stoßen sie bei der Darstellung räumlicher Aspekte an ihre Grenzen. Durch die

Kombination mit GIS-Software könnten diese Einschränkungen überwunden und die Modelle auch auf Bergregionen und deren spezifische Risiken angewandt werden. Die Modelle dienen hauptsächlich dazu, das Systemverständnis und eine ganzheitliche Sichtweise zu fördern. Mit zusätzlicher Einbindung partizipativer Ansätze kann die Beurteilung von Anpassungsstrategien verbessert und sowohl bauliche als auch nicht-bauliche Maßnahmen gesetzt werden (vgl. Terzi et al., 2019, S. 766f.).

4. Event and fault trees: Die Techniken der Ereignis- und Fehlerbaumanalyse sind vor allem im Sicherheitsengineering verbreitet. Sie helfen, die Ursachen für das Scheitern von Infrastrukturen zu verstehen und Maßnahmen zu ihrer Verringerung zu identifizieren. Während Fehlerbäume die Ereignisse aufzeigen, die zu Fehlern führen können, untersuchen Ereignisbäume die Folgen von Unfällen und unterstützen somit die Findung von Präventionsstrategien. In diesen Diagrammen werden verschiedene Szenarien und deren Wahrscheinlichkeiten dargestellt, um so Risikoketten zu analysieren. Studien von Lacasse et al. (2008), Marzocchi et al. (2012) und anderen haben gezeigt, wie diese Methoden in Gebirgsregionen angewandt wurden, beispielsweise zur Bewertung des Risikos eines Felssturzes, der einen Tsunami auslösen könnte. Diese Analysen haben sich besonders auf die Untersuchung von Gefahrenketten konzentriert. Baumdiagramme stoßen bei nicht-linearen Systemen an ihre Grenzen, da sie Rückkopplungsschleifen und wechselseitige Beziehungen schwer darstellen können. Sie nutzen Wahrscheinlichkeitsrechnungen, um die Unsicherheit und zeitlichen Abläufe von Risikoprozessen zu erarbeiten. Räumliche Analysen sind weniger verbreitet, aber es gibt Beispiele, in denen solche Ansätze zur Risikobewertung genutzt wurden (vgl. Terzi et al., 2019, S. 767f.).
5. Hybrid models: Wie der Name bereits sagt, stellen Hybrid models eine Kombination aus verschiedenen Analysemethoden dar. Hybride Modelle haben das Ziel, komplexe Risikoprozesse aus verschiedenen Perspektiven besser zu erfassen. Verschiedene Informationen aus unterschiedlichen Bereichen werden für eine umfassende Risikobewertung herangezogen. Allerdings stellt das eine große Herausforderung dar. Während soziale und ökologische Aspekte wesentliche Bestandteile der Risikobewertung sind, liegt der Fokus häufig auf der Untersuchung physischer und

wirtschaftlicher Schäden. Besonders im Zusammenhang mit wasserbezogenen Themen wie Hochwasser, Trockenheit und Wasserqualität, werden soziale und wirtschaftliche Aspekte in die Risikoanalyse einbezogen. Anwendungen auf Naturgefahren in Bergregionen sind selten, aber es lassen sich einige Erkenntnisse dieser Analyse auf solche Gebiete übertragen. Bestehende Untersuchungen nutzen oft eine Mischung aus Wahrscheinlichkeitsberechnungen und deterministischen Methoden, um Unsicherheiten zu managen und sowohl quantitative als auch qualitative Daten zu integrieren. Der Einsatz partizipativer Ansätze ermöglicht es, schnell Modelle zu erstellen, die lokale Perspektiven und Risikoeinschätzungen miteinbeziehen. Einige Studien haben zusätzlich räumliche und zeitliche Analysen durchgeführt, um Veränderungen und mögliche Auswirkungen, einschließlich zukünftiger Klimawandelszenarien, zu bewerten. Die Darstellung komplexer Systeme erfordert oft einen hohen Datenaufwand und führt zu komplexen Modellen, die eine Vielzahl von Methoden auf unterschiedlichen Ebenen integrieren (vgl. Terzi et al., 2019, S. 768).

In Österreich stellen Gefahrenzonenpläne eine wichtige Grundlage für die Raumplanung sowie für das Risikomanagement von Naturgefahren dar. Es gibt zwei Hauptarten von Gefahrenzonenplanungen, die sich in ihrer Zuständigkeit und historischem Kontext unterscheiden. Die Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) ist seit den 1970er Jahren für die Erstellung von Gefahrenzonenplänen zuständig. Im Gegensatz dazu begann die Bundeswasserbauverwaltung (BWV) erst 2015 mit der Erstellung solcher Pläne. Gefahrenzonenpläne berücksichtigen spezifische Naturgefahren und dienen vorrangig dazu, betroffene Gebiete hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit und der möglichen Auswirkungen von Ereignissen zu klassifizieren. Die Pläne zeigen nicht nur wo bestimmte Gefahren auftreten können, sondern auch wie intensiv diese sein können. Gefahrenzonenpläne basieren auf rechtlichen Grundlagen. Das Forstgesetz 1975 bildet dabei die Basis für die Gefahrenzonenpläne der WLV und das Wasserrechtsgesetz 1959 für die BWV. Die WLV betrachtet in erster Linie Ereignisse in Verbindung mit Wildbächen, Lawinen und Erosionen und die BWV betrachtet und analysiert Prozesse wie Hochwasser, Feststofftransporte und Murgänge. Aufgrund der vermehrten Hochwasserkatastrophen in Österreich sind Gefahrenzonenpläne der BWV für den Hochwasserschutz sowie für die Sicherheit der

Menschen in betroffenen Gebieten von großer Bedeutung (vgl. Jöbstl, 2024; vgl. BML-GZPV, o. J.).

Nach dem Forstgesetz 1975 der Gefahrenzonenpläne (ForstG-GZPV) sind folgende Bereiche und Naturgefahren in Gefahrenzonenplänen dargelegt:

§ 3. (1) Im Gefahrenzonenplan sind darzustellen:

- 1. Einzugsgebiete von Wildbächen und Lawinen,*
- 2. durch Wildbäche oder Lawinen gefährdete Bereiche (Gefahrenzonen) und*
- 3. Bereiche (Vorbehaltsbereiche),*
 - a) deren Freihaltung für spätere Schutzmaßnahmen, für die gewässereigene Ablagerung oder sonstige Ablagerung von Sedimenten von den Dienststellen für erforderlich erachtet wird oder*
 - b) die wegen ihrer Schutzfunktion hinsichtlich Wildbach- und Lawinengefahren besonders zu bewirtschaften sind.*

(2) Zusätzlich zu den Darstellungen nach Abs. 1 sind folgende Hinweise zulässig:

- 1. auf andere als durch Wildbäche und Lawinen verursachte Naturgefahren, wie Steinschlag, Rutschung und Erosion (Hinweisbereiche andere Naturgefahren),*
- 2. auf die Beschaffenheit von Gelände und von Boden, soweit durch diese Beschaffenheit eine Schutzfunktion beeinflusst wird (Hinweisbereiche Gelände und Boden) und*
- 3. auf Flächen, die durch Hochwässer, Muren oder Lawinen niedriger Wahrscheinlichkeit mit einem voraussichtlichen Wiederkehrintervall von 300 Jahren gefährdet sind oder auf Szenarien für die Restgefährdung (Hinweisbereiche Gefährdung niedriger Wahrscheinlichkeit).*

(RIS - ForstG-Gefahrenzonenplanverordnung - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 13.04.2024, 2024)

Daraus wird ersichtlich, dass derzeitige Gefahrenzonenpläne sich auf eine spezifische Art von Naturgefahr, wie beispielsweise Lawinen, konzentrieren. Die Berücksichtigung von Multigefahren und deren Auswirkungen und Risiken ist in momentanen Gefahrenzonenplänen oft limitiert. Situationen, in denen mehrere Gefahren zusammenwirken und sich gegenseitig verstärken, sind vor allem in alpinen Regionen von

hoher Bedeutung und werden auch durch den Klimawandel in Zukunft Berücksichtigung finden müssen. Wie am Anfang des Kapitels beschrieben, gibt es bereits einige Ansätze zur Analyse und Beurteilung von Multi-Hazards, welche in den kommenden Jahren immer mehr implementiert werden müssen. Dennoch stellt die praktische Umsetzung von Multi-Hazard Analysen eine Herausforderung dar. Hochrainer-Stigler et al. (2024) beschreiben die Herausforderungen des Managements von indirekten und kaskadierenden Risiken und betonen dabei die Wichtigkeit und langfristige Zusammenarbeit zwischen Politik und Wissenschaft. Projektorientierte Forschung sollte ausgedehnt und langfristige Kooperationen gefördert werden. Zudem sollten Expertinnen und Experten derzeitige Risikoanalysen adaptieren, um die Bedürfnisse und Herausforderungen von Multi-Hazards und Klimawandel berücksichtigen zu können (vgl. Hochrainer-Stigler et al., 2024, S. 1ff.).

Margreth Keiler, Professorin am Institut für Geografie und Direktorin des Instituts für interdisziplinäre Gebirgsforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Innsbruck, erörtert in einem Interview die komplexen Interaktionen zwischen Klimawandel und Naturgefahren in den Alpen, besonders im Hinblick auf Kaskadeneffekte. Trotz der gravierenden potentiellen Auswirkungen dieser Kaskadeneffekte sind sie derzeit noch nicht systematisch in Gefahrenzonenplänen berücksichtigt, welche hauptsächlich auf historischen Daten und isolierten Ereignissen basieren. Die Unvorhersehbarkeit solcher Effekte stellt große Herausforderungen dar, da sie oft unbemerkt bleiben, bis erhebliche Schäden entstehen. Daher betont Keiler die Notwendigkeit, die Forschung in diesem Bereich zu intensivieren und die Gefahrenzonenpläne entsprechend anzupassen (vgl. Anninger, 2023).

Zudem hebt Sie hervor, dass Schäden durch Naturkatastrophen trotz des Klimawandels in den letzten Jahrzehnten stabil geblieben sind, was sie auf umfangreiche Investitionen in Schutzbauten zurückführt. Allerdings warnt sie, dass solche Bauten nur bis zu einer bestimmten Größenordnung schützen können und die Ausweitung der Bebauung in Risikogebieten das Schadenspotential erhöht hat. Abschließend fordert sie eine gesellschaftliche Diskussion über den richtigen Umgang mit Naturgefahren und den Bau von Schutzbauten, insbesondere vor dem Hintergrund des veränderten Risikoprofils durch den Klimawandel (vgl. Anninger, 2023).

In Österreich gibt es bereits einige Initiativen und Projekte, die sich mit der Analyse und Vorbeugung von Multi-Hazards beschäftigen. Ein Beispiel ist die Austrian Multi-Hazard impact-based Advice Services Initiative (kurz: AMAS), die Fachexperten vernetzt, um Katastrophenschutzbehörden optimal zu beraten. Ziel ist eine genaue Gefahrenidentifikation sowie eine Überwachung von mehreren Gefahren. Die Initiative reagiert auf die steigenden Herausforderungen durch natürliche und menschliche Einflüsse, die immer häufiger und intensiver auftreten. Klimaveränderungen verstärken diese Problematik weiter. AMAS zielt darauf ab, durch Expertendienste präzise Vorhersagen zu treffen, was den beteiligten Partnerinnen und Partnern gleichermaßen zugutekommt. AMAS-Partnerschaften bauen auf bestehenden Kommunikationsstrukturen zwischen Katastrophenschutz und Fachleuten auf und erweitern diese stufenweise. Durch die Zusammenarbeit verschiedener relevanter Akteurinnen und Akteure entstehen Partnerschaften, die regionalen und nationalen Behörden angepasste und umsetzbare Informationen bieten können. In einer Pilotphase, die seit Ende 2022 in Salzburg läuft und seit Oktober 2023 in den operationellen Betrieb übergegangen ist, werden maßgeschneiderte Bereitschaftskonzepte entwickelt. Die Partnerschaft besteht aus der Landeshydrologie, Landesgeologie, Landeswasserbau, Landesimmissionsschutz, Landesforstdirektion sowie der Wildbach- und Lawinenverbauung. Durch die Kooperation dieser Organisationen werden hilfreiche Informationen an den Landeskatastrophenschutz weitergegeben. Der Betrieb wird von GeoSphere Austria koordiniert, die zusätzlich ihr Wissen in die Bereiche Wetter, Erdbeben und Lawinen einbringen. Die AMAS bietet ihr Expertenwissen für begründete Entscheidungen an und expandiert nun in weitere österreichische Bundesländer wie die Steiermark. Das große Ziel von AMAS ist, unabhängig von der Einsatzebene, die optimale Aufbereitung von Multi-Gefahren-Einschätzungen für den Katastrophenschutz und das Bestreben, Überraschungen zu minimieren und auf Ereignisse effektiv reagieren zu können (vgl. GeoSphere Austria, 2023).

7.3 Technische Schutzmaßnahmen alpiner Multi-Hazards

Allgemein haben Schutzmaßnahmen das Ziel, die Bevölkerung und Infrastruktur bestmöglich vor Naturgefahren zu schützen. Errichtete Schutzbauwerke sollen dabei den Naturgefahrenprozess nach einem zuvor festgelegten Bemessungsereignis kontrollieren und ohne angerichtete Schäden ableiten (vgl. Fink, 2018, S. 54). Schutzmaßnahmen vor alpinen Naturgefahren wie gravitative Massenbewegungen und Lawinen lassen sich ganz allgemein in permanente und temporäre Maßnahmen unterscheiden. Permanente Schutzmaßnahmen weisen eine Funktionsdauer von mindestens 50 Jahren auf. Darunter fallen technische Schutzmaßnahmen sowie forstlich-biologische Schutzmaßnahmen (z.B. Schutzwald). Auch raumplanerische Maßnahmen sind zur Prävention von Naturgefahren entscheidend. Alle Maßnahmen müssen neben dem Ursprungs- bzw. Quellgebiet der Gefahr auch die Transportwege sowie die Ablagerungsgebiete beachten. In diesem Kapitel stehen die technischen Schutzmaßnahmen im Fokus (vgl. Glade & Stötter, 2008, S. 158).

In der Fachpolitik werden Planungsstrategien zum Schutz vor Naturgefahren bevorzugt, während die öffentliche Meinung technische Schutzmaßnahmen als effektivste Lösung ansieht. Diese Maßnahmen sind allerdings mit hohen Kosten verbunden und greifen oft stark in die Umwelt ein. Zudem benötigen sie ständige Wartung und Überwachung, um ihre Funktion zu gewährleisten. Für einen wirksamen Einsatz technischer Schutzmaßnahmen sind umfassende Kenntnisse über deren Einsatzbereich, Anwendungsgrenzen und Haltbarkeit erforderlich. Technische Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren können in folgende Kategorien eingeteilt werden:

- Schutzwasserbau
- Mobiler Hochwasserschutz
- Wildbachverbauung
- Lawinenverbauung
- Steinschlagverbauung
- Technische Schutzmaßnahmen gegen Rutschungen
- Technischer Schutz gegen Felsstürze
- Technischer Windschutz

(vgl. Rudolf-Miklau, 2009, S. 148)

Technische Schutzmaßnahmen greifen aktiv in natürliche Prozesse ein, um deren Entstehung abzuwehren oder die Auswirkungen abzuschwächen bzw. ganz zu blockieren. Sie werden typischerweise eingesetzt, um sich vor Naturereignissen mit hoher kinetischer Energie und großer Masse, wie schnelle Fließ- und Sturzvorgänge, zu schützen, die von kurzer bis mittlerer Dauer sind (vgl. Rudolf-Miklau, 2009, S. 148). Vor allem in Gebieten, die intensiv genutzt werden und der besiedelte Raum stark begrenzt ist, wie beispielsweise in alpinen Regionen, steigt der Schutz- und Sicherheitsbedarf gegen Naturereignisse kontinuierlich an. Durch technische Schutzmaßnahmen und Schutzbauwerke kann das Risiko von Naturgefahren und Naturkatastrophen erheblich reduziert werden, allerdings kann ein absoluter Schutz vor Naturgefahren nicht gewährleistet werden (vgl. BML, o. J.).

Die Hauptprinzipien technischer Schutzmaßnahmen umfassen:

- **Ableitung (Regulierung):** Hierbei wird z.B. Hochwasser auf dem kürzesten Weg um ein Gefahrengebiet herumgeleitet.
- **Stabilisierung (Konsolidierung):** Maßnahmen zur Festigung instabiler Hänge und zur Verhinderung von Erosion in Wildbächen.
- **Umgehung (Bypass):** Ähnlich der Ableitung wird Wasser um den Risikobereiche herumgeführt.
- **Retention:** Rückhaltung von Wasser und Feststoffen oberhalb gefährdeter Bereiche.
- **Dosierung:** Temporäre Speicherung von Hochwasser gefolgt von kontrollierter Freisetzung.
- **Bremsung:** Eindämmung hochenergetischer Vorgänge wie Steinschläge oder Lawinen durch robuste Bauwerke.
- **Ablenkung:** Umlenkung der Bewegungsenergie von Naturereignissen weg vom Gefahrengebiet.
- **Anbruchverbau:** Verhindern des Auslösens von Lawinen, Felsstürzen oder Erosionsvorgängen durch präventive Bauwerke.

(vgl. Rudolf-Miklau, 2009, S. 149)

In Österreich gibt es nur für einzelne Naturgefahren gesetzliche oder normative Vorgaben für das Schutzniveau, das durch technische Maßnahmen erzielt werden soll. Die Bestimmung des

Schutzniveaus obliegt demnach hauptsächlich der Bauleitung, der selbst entscheidet, welchen Grad an Sicherheit er erreichen möchte. Spezifische Vorgaben bestehen jedoch für öffentliche Schutzmaßnahmen, die in den jeweiligen Richtlinien festgelegt sind (vgl. Rudolf-Miklau, 2009, S. 154). In Österreich werden diese spezifischen Vorgaben, die u.a. das Ausmaß der Schutzziele sowie deren Finanzierung beinhalten, in den technischen Richtlinien für den Wasserbau (TRL-WB) und den technischen Richtlinien für die Wildbach- und Lawinenverbauung (TRL-WLV) beschrieben. Beide Richtlinien wurden gemäß dem Wasserbautenförderungsgesetz erlassen (vgl. Neuhold & Stiefelmeyer, 2023; vgl. BML, 2015).

Allgemein können technische Schutzmaßnahmen keine absolute Sicherheit bieten. Schutzmaßnahmen werden nach Bemessungsereignissen gebaut und bieten dementsprechend Schutz gegen Naturgefahren. Für Ereignisse, die weit über dem Durchschnitt liegen, besteht ein Restrisiko durch Überlastung oder technisches Versagen der Bauten. Ganzheitliche Schutzkonzepte sollten also neben dem gegebenen Schutz (bis zu einem bestimmten Bemessungsereignis) auch das Restrisiko berücksichtigen (vgl. Rudolf-Miklau, 2009, S. 154).

Insgesamt sind in Österreich rund 1.600 Gemeinden von insgesamt 2.357 Gemeinden von Naturgefahren wie Lawinen, Wildbächen und Erosion betroffen. An 100.000 Flusskilometern und insgesamt 9.000 Seen tritt Hochwasser auf. Rund 30 Personen sterben jährlich aufgrund eines Lawinenereignisses. Daher sind präventive Maßnahmen gegen Naturgefahren unumgänglich. Neben präventiver Gefahren- und Risikoplanung auf Grundlage der Gefahrendarstellung, des Naturgefahrenmonitorings, der forstlich-biologische Schutzmaßnahmen zählen die technischen Schutzmaßnahmen zu den wichtigsten Bereichen der Naturgefahrenprävention. Hier einige Beispiele von öffentlichen technischen Schutzmaßnahmen:

- Flussregulierungen und Flusseindämmungen zum Schutz von Siedlungsräumen vor Hochwasser (Ablenkung und Retention von Hochwasser).
- Geschiebesperren zur Eindämmung Hochwasser führender Wildbäche.
- Anbruchverbauungen (Stahlstützwerke, Schneenetze), Leit- und Auffangdämme zum Schutz vor Lawinen.

(vgl. Plattform Naturgefahren der Alpenkonvention (PLANALP), 2010).

Traditionelle Ansätze zur Prävention von Naturgefahren, wie die Definitionen für „Hochwasserschutz“ gemäß DIN 4047-2:1988 oder „Wildbachverbauung“ nach ONR 24800:2009, konzentrieren sich hauptsächlich auf die Verhinderung potentieller Gefahren durch bauliche Maßnahmen. Diese Maßnahmen sollen entweder das Entstehen von Naturgefahrenprozessen verhindern oder die Schäden von schutzbedürftigen Objekten fernhalten. Technische Schutzkonzepte, die auf einem simplen Effektivitätsmodell basieren, sind jedoch aus mehreren Gründen in ihrer Anwendung begrenzt:

1. Zeitliche Begrenzungen: Der Schwerpunkt liegt oft nur auf der Planungs- und Ausführungsphase, während Betrieb, Wartung und Rückbau weniger Beachtung finden.
2. Kausale Begrenzungen: Es wird ein linearer Planungsprozess verwendet, der auf ein spezifisches Schutzziel ausgerichtet ist und Interaktionen mit anderen Zielen oder Nutzungsforderungen vernachlässigt.
3. Begrenzung der Schutzwirkung: Die Konzepte bieten Schutz bis zu einem festgelegten Bemessungsereignis (z.B. HQ_{100}). Risiken, die dieses Bemessungsereignis überschreiten, werden in der Planung oft nicht bedacht.
4. Sektorale Begrenzungen: Die Betrachtung erfolgt isoliert für einzelne Schutzmaßnahmen, wie den baulichen Hochwasserschutz, ohne die Wechselwirkungen mit anderen Naturgefahren und Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen.

(vgl. Rudolf-Miklau & Rimböck, 2016, S. 875ff.).

Diese Einschränkungen unterstreichen die Notwendigkeit, umfassendere und flexiblere Ansätze in der Planung und Ausführung von Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren zu integrieren. Durch das integrale Risikomanagement werden strukturelle und nicht strukturelle Maßnahmen in umfassenden Schutzsystemen vereint, die darauf abzielen, Risiken auf ein akzeptables Maß zu reduzieren und Restrisiken zu berücksichtigen. Diese Systeme beinhalten neben technischen Dimensionen auch rechtliche, politische, sozioökonomische und ökologische Aspekte, was die Planung komplex macht. Lineare Planungs- und Managementprozesse des Naturgefahrenschutzes sind aktuell beispielsweise im technischen

Hochwasserschutz noch sehr weit verbreitet. Diese lineare Denkweise muss Schritt für Schritt zu einem „Systemansatz“ für Schutzkonzepte konzipiert werden. Schutzsysteme gegen Naturgefahren stellen eine Kombination aus vielseitigen, zusammenhängenden Maßnahmen dar. Ziel ist es, das Risiko bestmöglich zu reduzieren. Beispiele für Schutzsysteme sind der Donauhochwasserschutz der Stadt Wien oder ein Lawinenschutzsystem für ein großes Skigebiet. Schutzsysteme interagieren innerhalb ihres Kontextes (Gesellschaft, Naturraum) mit verschiedenen anderen Systemen (Prozesse der Naturgefahren, Umwelt, Rechtssystem, politisches System, technische Standards) und orientieren sich an multifunktionalen Zielen wie Schutzziele, Umweltziele, ökonomische und gesellschaftspolitische Ziele. Schutzsysteme müssen sich kontinuierlich anpassen, bedingt durch Veränderungen der Umwelt wie Klimawandel, die Auswirkungen von Extremereignissen, technologische Fortschritte, aktuelle technische Standards und veränderte Sicherheitserwartungen. Vorhandene Schutzbauwerke müssen daher regelmäßig geprüft werden und Schutzziele laufend neu bewertet werden (vgl. Rudolf-Miklau & Rimböck, 2016, S. 875ff.).

Der österreichische Alpenraum ist durch seine spezifischen naturräumlichen Gegebenheiten und der intensiven Raumnutzung besonders anfällig für Extremereignisse und Multi-Hazards. Der voranschreitende Klimawandel führt dazu, dass Extremwetterereignisse in ihrer Häufigkeit, Stärke und Reichweite steigen und auch Gebiete erreichen, die bislang unberührt blieben. Um diesen Ereignissen und Kaskadeneffekten auch zukünftig noch effektiv standhalten zu können, ist eine systematische und ganzheitliche Betrachtung und eine enge Zusammenarbeit mit allen betroffenen Bereichen und Sektoren notwendig. Die erfolgreiche Abwehr von Naturgefahren in der Zukunft setzt voraus, dass sämtliche verfügbaren Präventionsmaßnahmen in allen betroffenen Bereichen vollständig umgesetzt werden (vgl. Balas et al., 2024, S. 32f.).

Die wirksamste Strategie zur Minimierung von Risiken durch Naturgefahren besteht darin, gefährdete Gebiete grundsätzlich zu meiden. In zahlreichen Tälern und Berggebieten ist dies jedoch aufgrund intensiver Flächennutzung sowie der Kombination und des Zusammentreffens verschiedener Naturkatastrophen oft nicht möglich, da kaum sichere Zonen vorhanden sind. Technische Schutzmaßnahmen können Siedlungs- und Wirtschaftsräume bis zur Grenze des Bemessungsereignisses vor Naturgefahren schützen. Allerdings ist durch die Zunahme von Extremereignissen und dem Zusammenspiel

verschiedener Naturgefahren durch technische Schutzmaßnahmen keine absolute Sicherheit gegeben. Um den Schutz vor Naturrisiken zukünftig zu optimieren, ist eine nachhaltige Raumentwicklung und Raumplanung unter Berücksichtigung der Gefahrenzonenpläne einzuhalten. In der regionalen sowie lokalen Raumplanung sollten beispielsweise Maßnahmen implementiert werden, die den Wasserrückhalt fördern und die Wiederherstellung natürlicher Überschwemmungsgebiete sicherstellen (vgl. Balas et al., 2024, S. 32f.).

Auch die Messsysteme zur Beobachtung (Monitoring) von Ereignissen tragen essenziell zum Schutz vor Naturgefahren bei und müssen an die zukünftigen Herausforderungen angepasst werden. Sie helfen dabei Gefahrenprozesse zu analysieren und zu bewerten und in späterer Folge dementsprechende Schutzmaßnahmen abzuleiten. Auch Prognosen und Frühwarnsysteme sind notwendig, um Menschen und Infrastruktur vor den mächtigen Naturereignissen zu schützen (vgl. Balas et al., 2024, S. 32f.).

Multi-Hazard-Ansätze werden in der Risikobewertung immer wichtiger. Diese Ansätze betrachten die interaktiven Risiken verschiedener Gefahren, wodurch die Schutzmaßnahmen angepasst werden können und somit einen effektiveren und umfassenderen Schutz gegen Multi-Hazards und Kaskadeneffekte bieten. Der Klimawandel verstärkt die Notwendigkeit, Multi-Hazard-Ansätze zu berücksichtigen, da er die Häufigkeit und Intensität vieler Naturgefahren erhöht und neue Risikokonstellationen schafft. Unterschiedliche Organisationen wie beispielsweise die Vereinten Nationen beschäftigen sich derzeit intensiv mit Multi-Hazard-Ansätzen in der Katastrophenvorsorge und unterstreichen die Wichtigkeit eines integralen Risikomanagements (vgl. Balas et al., 2024, S. 32f.; vgl. United Nations Office for Disaster Risk Reduction and World Meteorological Organization, 2023, S. 18ff.).

Auch das Institut für Alpine Naturgefahren der Universität für Bodenkultur in Wien untersucht und entwickelt gemeinsam mit Partnerinnen und Partnern aus unterschiedlichen europäischen Ländern innovative Lösungen, um die Infrastruktur und die Gesellschaft vor Extremereignissen zu schützen. Multi-Hazards können schnell zu einem Extremereignis werden und auch der momentane Anstieg der Temperaturen sowie der sozio-ökonomische Wandel der Gesellschaft haben Einfluss auf die Gefährdung durch Naturgefahren und erfordern ein Umdenken im Naturgefahrenmanagement. Im Forschungsprojekt *TRANS-ADAPT* werden herkömmliche bauliche Schutzmaßnahmen mit alternativen Nutzungskonzepten ausgeweitet. Die Idee ist, Schutzbauten nicht nur als Schutzmaßnahme

vor Naturgefahren zu betrachten, sondern diese zusätzlich beispielsweise als Einkaufszentrum, kulturelle Einrichtung oder für die Freizeit zu nutzen. Alternative Schutzmaßnahmen schließen die Gemeinde in den Entscheidungsprozess verstärkt ein, um den größtmöglichen Nutzen auch für die Gemeinde zu erzielen. Ehemalige Überflutungs- und Ablagerungsflächen können wiederhergestellt und umfunktioniert werden und können so einen Nutzen für alle Beteiligten bieten. Multifunktionale Schutzkonzepte stellen neue Herausforderungen: Welche Fläche wird verwendet? Welche Doppelfunktion könnte umgesetzt werden? Wie erfolgt die Finanzierung beziehungsweise die Instandhaltung? Wer übernimmt die Haftung in einem Schadensfall? Ziel dieser Bauten ist, ungenutzten Raum in Schutzbauwerken bestmöglich zu nutzen. Vor allem in Gebieten mit begrenzter Landnutzung wie beispielsweise in den oberen alpinen Einzugsgebieten sind diese multifunktionalen Schutzbauten sehr lukrativ (vgl. Thaler et al., 2018a, S. 230ff.).

8 Zusammenfassung

Im ersten Teil der Arbeit werden die Konzepte und Definitionen von Naturereignissen, Naturgefahren und Naturkatastrophen beschrieben. Naturereignisse werden als neutrale natürliche Prozesse definiert, während Naturgefahren potentielle negative Auswirkungen auf Menschen und Umwelt einschließen. Von Naturkatastrophen wird gesprochen, wenn solche Ereignisse mit erheblichen Schäden verbunden sind. Naturgefahren können nicht nur einzeln, sondern auch gemeinsam auftreten. Dabei spricht man von Multi-Hazards. Mehrere Gefahren können dabei simultan oder sequenziell auftreten, was zu kaskadenartigen oder kumulativen Effekten führt. Verstärken sich einzelne Gefahren gegenseitig, so können diese schnell zu einem Extremereignis werden. Extremereignisse werden als stark von normativen Werten abweichende Naturereignisse definiert, deren Einordnung von der Häufigkeit und räumlichen Skalierung abhängt.

Für das Verständnis und die Analyse von Naturgefahren, ihre potentiellen Auswirkungen und die damit verbundenen Risiken sind die Begriffe Vulnerabilität, Exposition sowie Risiko essenziell. Vulnerabilität bezieht sich auf die Anfälligkeit von Gemeinschaften oder Systemen gegenüber Naturgefahren, während Exposition das Vorhandensein von Menschen oder Eigentum in gefährdeten Bereichen beschreibt. Risiko ergibt sich aus der Kombination von Gefahr, Exposition und Vulnerabilität.

Das Kapitel "Analyse und Bewertung alpiner Naturgefahren" beschreibt Ansätze und Methoden im Umgang mit Naturgefahren. Die Durchführung von Gefahren- und Risikoanalysen steht im Zentrum der Betrachtung und zielt darauf ab, die Wahrscheinlichkeit und das Ausmaß möglicher Schäden zu bestimmen.

Im ersten Teil wird die historische Entwicklung der geografischen Hazardforschung betrachtet, die ihre moderne Form in den 1940er Jahren in den USA annahm. Wesentliche Beiträge stammen von Gilbert Fowler White, der die Interaktion zwischen Menschen und ihrer Umwelt in den Mittelpunkt stellte. Seitdem hat sich das Verständnis von Naturgefahren von einem fatalistischen zu einem präventiven und systematischen Ansatz gewandelt.

Im zweiten Teil wird auf die Gefahren- und Risikoanalyse sowie die Bewertung von Naturgefahren eingegangen. Dabei geht es in einem ersten Schritt darum, die Naturgefahren zu identifizieren, um diese dann bewerten zu können. Weiters kann das Risiko einer

Naturgefahr bewertet werden. Risikoanalysen ermöglichen eine Ableitung adäquater Schutzmaßnahmen, die zu einer Reduktion des Risikos führen.

Das Schadenspotential kann durch eine detaillierte Analyse der betroffenen Objekte und Bereiche ermittelt werden. Ziel ist es, das maximale Schadensausmaß, das eintreten könnte, abzuschätzen. Hierzu werden historische Daten, mathematische Modelle und GIS-Technologien verwendet.

Der österreichische Alpenraum ist ein einzigartiger Naturraum, der vor vielen Herausforderungen steht. Der Klimawandel trifft den österreichischen Alpenraum besonders stark und Naturgefahren sind aus dieser Region nicht wegzudenken. Naturgefahren wie Murgänge, Lawinen, Hochwasser und Erdbeben sind in alpinen Regionen keine Seltenheit. Naturgefahren können nicht nur einzeln, sondern auch gemeinsam auftreten. Die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Gefahrenarten und die daraus resultierenden Kaskadeneffekte, erfordern ein umfassendes Verständnis der Risikolandschaft im Alpenraum. Durch die Analyse dieser Interaktionen wird deutlich, dass alpine Naturgefahren oft nicht isoliert auftreten, sondern vielmehr in komplexen und ineinandergreifenden Szenarien, die die Risikobewertung und das Management von Naturgefahren erschweren. Multi-Hazards unterstreichen die Bedeutung eines integrierten Ansatzes zur Bewertung und zum Management von Naturgefahren im Alpenraum, insbesondere angesichts der durch den Klimawandel veränderten Bedingungen, die das Risiko und die Komplexität von Naturgefahren erhöhen.

Das integrale Risikomanagement, das als systematischer und systemischer Prozess zur Minderung der Auswirkungen von Naturgefahren beschrieben wird, umfasst die Phasen Vorbeugung, Bewältigung und Regeneration. Es wird erläutert, wie sich der Umgang mit Naturgefahren von einer einfachen Gefahrenabwehr zu einem umfassenden Risiko-Governance-Ansatz entwickelt hat. Dieser Ansatz betont die Notwendigkeit einer engen Zusammenarbeit zwischen Politik, Bevölkerung und anderen Akteurinnen und Akteuren zur gemeinsamen Lösung von Risiken.

9 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Hypothesen und Forschungsfragen dieser Masterarbeit zusammengefasst, beantwortet und diskutiert.

Hypothese 1: Einzelne alpine Naturgefahren verstärken sich stufenweise gegenseitig und werden so zu einem Extremereignis.

Forschungsfragen:

- Was versteht man unter alpinen Naturgefahren und Multi-Hazards?
- Welche Kombinationen von Multi-Hazards können in der Alpenregion auftreten?
- Inwiefern können Naturgefahren durch den Kaskadeneffekt zu Extremereignissen werden?

Allgemein versteht man unter Naturgefahren einen natürlichen Prozess, der mit einem potentiellen Schaden für Mensch, Natur oder Infrastruktur einhergeht. Treten diese potentiell schadenbringenden Prozesse in Gebirgsregionen auf, werden diese als alpine Naturgefahren bezeichnet. Zu den alpinen Naturgefahren zählen unter anderem Murgänge, Lawinen, Steinschläge, Gletscherabbrüche und Hochwasser. Treten mehrere Naturgefahren gleichzeitig oder aufeinanderfolgend auf, so spricht man von Multi-Hazards. Diese kumulativen oder kaskadierenden Interaktionen können zu komplexen und oft schwer vorhersehbaren Schadensereignissen führen.

In der Alpenregion können verschiedene Kombinationen von Multi-Hazards auftreten. Beispielsweise können Massenbewegungen wie Stürze und Rutschungen ein Flutereignis auslösen. Starke und/oder langanhaltende Niederschläge und Schneeschmelze im Frühjahr können zu simultanen Überschwemmungen von Flüssen und Wildbächen sowie zu einem vermehrten Auftreten von Hangbewegungen führen. Das wiederum kann zu einer Verstärkung von Flutschäden beitragen. Löst ein Naturereignis eine weitere Gefahr aus oder verstärkt die Anfälligkeit dieser Gefahr, so wird von einem Kaskadeneffekt gesprochen. Situationen, in denen es zu einer Kette von Naturereignissen kommt, können schnell zu Extremereignissen werden. Zum Beispiel kann ein Erdbeben, das durch Starkregen ausgelöst wird, einen Fluss blockieren und zu einem Dammbruch führen. Die plötzliche Freisetzung von

Wasser könnte massive Überschwemmungen verursachen und weitere Murgänge oder Lawinen auslösen. Kaskadeneffekte können das Schadenspotential extrem erhöhen, da die kombinierten Effekte der verschiedenen Gefahren schwerer zu kontrollieren und komplexer zu bewältigen sind als isolierte Ereignisse.

Hypothese 2: Multi-Hazards werden in Risikoanalysen alpiner Naturgefahren und entsprechender Schutzmaßnahmen nicht beachtet.

Forschungsfragen:

- Wie werden Risikoanalysen alpiner Naturgefahren durchgeführt?
- Inwiefern werden alpine Multi-Hazards in Risikoanalysen berücksichtigt?
- Inwiefern werden Multi-Hazards in aktuellen Schutzmaßnahmen vor alpinen Naturgefahren sowie in Gefahrenzonenplänen der Alpenregion beachtet?
- Reichen aktuelle Schutzmaßnahmen aus, um die Bevölkerung der Alpenregion vor Multi-Hazards zu schützen?

Die Risikoforschung besteht im Allgemein aus mehreren Bereichen und stellt somit eine interdisziplinäres Forschungsfeld dar. Im Naturgefahrenkontext werden die Gefahren und Risiken zuerst analysiert und in einem weiteren Schritt bewertet. Zudem folgt eine Vulnerabilitätsanalyse und Expositionsanalyse, um die Anfälligkeit und das Ausgesetztsein von Naturräumen, Infrastrukturen und Bevölkerung zu bestimmen. Erst dann können angepasste Schutzmaßnahmen abgeleitet werden. Insgesamt besteht das Ziel von Risikoanalysen darin, potentielle Risiken zu identifizieren, zu bewerten und zu managen, um die Sicherheit von Menschen und Umwelt zu gewährleisten. Aktuelle Methoden der Risikoanalysen, wie sie auch in dieser Arbeit beschrieben werden, konzentrieren sich häufig auf einzelne Gefahrenarten und einzelne Naturereignisse. Multi-Hazards werden dabei zum aktuellen Stand nur sehr begrenzt berücksichtigt. Die Komplexität sowie die hohe Unsicherheit bei der Modellierung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Gefahren machen es schwierig, umfassende Multi-Hazard-Analysen durchzuführen. Multi-Hazard-Analysen verlangen multidisziplinäre Ansätze, die die Gefahren mit ihren individuellen Prozesseigenschaften berücksichtigen und kombinieren können. Verschiedene Datensätze mit unterschiedlichen Fragestellungen und Fokussen müssen erhoben und integriert werden, um die Dynamik und Wechselwirkungen

zwischen den verschiedenen Naturgefahren feststellen zu können. In den letzten Jahren beschäftigt sich die Wissenschaft verstärkt mit Multi-Hazards und integrativen Risikoanalysen. Dennoch steht diese Forschung, insbesondere bezogen auf den Alpenraum, noch relativ am Anfang. Der Grund dafür liegt wahrscheinlich an der lückenhaften Datengrundlage vergangener Ereignisse. Einige Methoden und Ansätze wurden bereits entwickelt, die sich mit den Risiken von Multi-Hazards beschäftigen. Allerdings sind diese Ansätze oft noch mit viel Unsicherheit verbunden. Ein Bedarf an Adaption der Überlegungen ist demnach vorhanden. Zudem erschweren die momentan zu beobachtenden klimatischen Veränderungen die ohnehin schon komplexen Herausforderungen im Umgang mit Multi-Hazards. Der Klimawandel trifft den Alpenraum besonders stark und die Intensität, Verteilung und Häufigkeit von Naturgefahrenprozessen können sich regional ändern oder auch zunehmen. Gleichzeitig aber besteht eine hohe Unsicherheit, welche Effekte konkret im Zusammenhang mit dem Klimawandel zu erwarten sind, so der IPCC 2021. Somit stehen Institutionen, die für den Katastrophenschutz zuständig sind vor neuen, sehr komplexen Herausforderungen. Strategien, Planungen und Managementpläne müssen den sich ändernden Risikoszenarien angepasst werden und die vielen Unsicherheitsfaktoren berücksichtigen (vgl. Andreu et al., 2022).

In aktuellen technischen Schutzmaßnahmen gegen alpinen Naturgefahren sowie in Gefahrenzonenplänen von Gemeinden und Regionen werden Multi-Hazards unzureichend bis kaum berücksichtigt. Gefahrenzonenpläne stützen sich meist auf historische Daten und einzelne Gefahrenereignisse und Gefahrentypen. Auch technische Schutzmaßnahmen wie Rückhaltebecken oder Lawinenverbauungen sind speziell für eine Gefahrenart ausgelegt und berücksichtigen nicht die möglichen Interaktionen und Wechselwirkungen verschiedener Gefahren. Moderne Analyseansätze können mittlerweile auch komplexere Ereignisfolgen simulieren, um somit notwendige Schutzmaßnahmen besser anpassen und erweitern zu können. Um den Schutz der Bevölkerung vor Naturgefahren in oft sehr dicht besiedelten und dicht verbauten Tälern der Alpen auch weiterhin aufrecht erhalten zu können, sind Anpassungen im Umgang mit Naturgefahren unumgänglich. Integrative Ansätze, die sowohl strukturelle als auch nicht strukturelle Maßnahmen umfassen sind notwendig. Alpine Täler stellen neben den Risikomanagerinnen und Risikomanager vor Ort auch die Politik vor große Herausforderungen. Einerseits soll der geringe Anteil des Dauersiedlungsraumes in den Alpen eine lokale (sozioökonomische) Entwicklung durchleben und andererseits soll der Schutz vor

zukünftigen (extremen) Naturereignissen aufrecht erhalten bleiben (vgl. Thaler et al., 2018b, S. 230). Um diese Ziele zu erreichen, braucht es verbesserte Frühwarnsysteme, umfassende Gefahren- und Risikoanalyse und dafür vor allem verstärkte interdisziplinäre Forschung und Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteurinnen und Akteuren und Institutionen.

10 Ausblick

Wie in den Ausführungen dieser Arbeit umfangreich beschrieben, handelt es sich bei den Studien und Forschungen zur Multi-Hazard-Problematik um eine relativ junge Wissenschaftsdisziplin. Der Risiko-Governance-Ansatz beschreibt sehr gut, dass es sich um einen interdisziplinären und systemischen Ansatz der Risikoforschung handelt. Daraus ist abzuleiten, dass die Bedeutung der Vernetzung mit unterschiedlichen Akteurinnen und Akteuren aus Politik, Versicherungen, Teilen der Bevölkerung, Wissenschaft und Forschung in der Zukunft ein viel größeres Augenmerk zukommt als bisher. Neue Disziplinen wie Big-Data und künstliche Intelligenz werden die Forschung und Weiterentwicklung im Bereich verbesserter Vorhersagen von multiplen Unwetterkatastrophen befeuern und unterstützen. Ein weiteres Ziel der Umsetzung muss es sein, die operativen Stakeholder mit den Akteurinnen und Akteuren aus Forschung und Wissenschaft stärker zu vernetzen und in eine intensivere Kommunikation zu kommen. Das Zusammenwirken einzelner Ministerien, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Versicherungen und Ingenieurbüros wird notwendig sein, um effiziente und effektive Prävention voranzutreiben. Zukunftsszenarien, in denen auch das Udenkbare angedacht wird, sollen und dürfen angesichts der möglichen nahenden Bedrohungen von Multi-Hazards kein Tabu mehr sein. Wie bei den meisten komplexen gesellschaftlichen, sozialen, politischen und ökologischen Problemstellungen gibt es auch bei dieser Herausforderung keine einfachen, monokausalen Antworten und Lösungen. Vielmehr braucht es ein neues Miteinander und konkurrenzbefreites Zusammenwirken, um ein komplexes, aber umsetzbares Management der Risiken zu verwirklichen.

Aktuell, im Juni 2024, sehen wir in einigen Regionen Österreichs, was lokale Unwetter, normalerweise kleine Flüsse und Bäche anrichten können: in der Steiermark verschüttet am 10.6. dieses Jahres eine Mure, ausgelöst durch Starkregen und einen reißenden Bach, zwei Kinder beim Wandern mit ihrer Mutter. Eines davon wurde mit Verletzungen ins Spital gebracht, das andere Kind erlag den Verletzungen. Große Regionen Österreichs und Süddeutschlands werden überflutet, Häuser stehen unter Wasser und hunderte, wenn nicht tausende Keller müssen ausgepumpt, vom Schlamm befreit und letztlich getrocknet und renoviert werden. Wir sehen anhand aktueller medialer Berichterstattung wie groß das Leid vieler Menschen durch solche plötzlich auftretenden Naturgewalten und

Umweltkatastrophen werden kann. Menschen verlieren innerhalb weniger Minuten ihr Hab und Gut. Die persönlichen und gesellschaftlichen Kosten, die derartige Umweltkatastrophen nach sich ziehen, sind immens.

Es geht in der Forschung zu diesem Thema am Ende darum, wie menschliches Leben und menschliche Existenzen effizienter geschützt werden können. Forschung und Wissenschaft werden in diesem jungen Zweig immer bedeutender. Es wird nach Interventionsmaßnahmen gesucht, die mehrere Ziele gleichzeitig verfolgen sollten: Schutz der Natur, Schutz der Menschen in diesen Lebensbereichen und ökonomische Interessen der Menschen, die in diesen Gebieten leben, also eine Integration von Ökologie und Ökonomie darstellen.

Durch die langjährigen vergangenen Eingriffe des Menschen in seine umgebende Natur ist diese längst kein natürliches System mehr, vielmehr handelt es sich um ein durch Menschenhand gestörtes System. Aus dieser Logik heraus, ist es notwendig, weitere menschliche reparierende Eingriffe in die Natur vorzunehmen, und zwar in dem Sinne, dass ursprüngliche Funktionen der Natur wieder hergestellt werden können. Wenn wir von Rückbau beziehungsweise von Renaturierung sprechen, bedeutet das nicht, die Natur des 19. Jahrhunderts wieder herstellen zu wollen. Vielmehr muss es bedeuten, die baulichen und technischen Eingriffe und Maßnahmen so zu gestalten, dass die Natur ihre vitalen und lebensschützenden Funktionen zurückgewinnen kann. Renaturierung bedeutet in diesem Zusammenhang die Ökosystemleistungen zu verbessern. Beim Plan der EU ist festzustellen, dass es um die Koexistenz und Balance zwischen Schutz und Nutzen der Natur gehen muss.

Die größten ökologischen Herausforderungen in den nächsten 30 bis 50 Jahren in Österreichs Alpen werden wohl der Klimawandel, damit zurückgehende Gletscher, auftauender Permafrost, dadurch Erwärmung unserer Gewässer, zunehmende Extremereignisse (Dürre, Überschwemmungen, Erdbeben), sowie starker Flächenfraß durch überbordende Landnutzung und Bodenversiegelung sein. Die Antwort der Wissenschaft auf diese zukünftigen Ereignisse muss es sein, notwendige menschliche Reparatur-Eingriffe in die Natur zu beforschen, also eine Grundlage für das Eingriffsmanagement zu sein. Sowohl Motive als auch Konsequenzen von menschlichen Interventionen werden im Fokus der Forschungsanalysen sein. Dabei zwingt die Komplexität von Ökosystemen die Forscherinnen und Forscher sowie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlicher zu systemischem Denken und Handeln. In der traditionellen wissenschaftlichen Forschung und auch in dieser hier vorliegenden Arbeit liegt der Fokus der Untersuchung auf wenigen, in diesem Fall auf zwei

Hypothesen. Das dient der Einengung komplexer Phänomene. Wir sehen jedoch bei tieferer Betrachtung, dass durch das Stellen von konkreten eingrenzenden Fragen immer neue Fragen auftreten. Die Grundlagenforschung ist dementsprechend gefordert, Prozesse zu erforschen und zu erkennen und in weiterer Folge den gesamten Kontext zu berücksichtigen. Um die Grundlagenforschung effektiv für die Menschen nutzbar zu machen, ist es logischerweise notwendig, Geld einzusetzen. Geld für die richtigen Präventions- und Schutzmaßnahmen. Es ist anzunehmen, dass die Gelder derzeit dafür nicht ausreichen. Es braucht sicherlich viel mehr Geld, um unsere Landschaften und Ökosysteme zu kurieren und zu reparieren. Bauliche Eingriffe in die Natur (Schutzbauten) und Renaturierungsmaßnahmen (Rückbau, Einrichten von Retentionsräumen) werden viel Geld kosten, schaffen im Gegenzug aber Arbeitsplätze und kurbeln die Wirtschaft dadurch an. Ökonomie und Ökologie sind immer gemeinsam zu betrachten, wenn man die Akzeptanz breiter Bevölkerungsschichten und der Politik damit erreichen will.

Literaturverzeichnis

Andrecs, P., Hagen, K., & Plörer, M. (2022, März 18). Risikomanagement von Rutschungen und Steinschlag. *BFW*. <https://www.bfw.gv.at/risikomanagement-von-rutschungen-und-steinschlag/>

Anninger, L. (2023, Juni 7). *Die Klimakrise macht die Alpen gefährlicher. Was geschieht da und wie passen wir uns an?* RiffReporter. <https://www.riffreporter.de/de/umwelt/klimakrise-naturgefahren-alpen-hochwasser-waldbrand-mure-lawine-forschung>

Balas, M., Lindinger, H., Völler, S., & Offenzeller, M. (2024). *Die Österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel: Executive Summary* (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Hrsg.).

Baldes, M. (2016). *Interkultureller Kompetenzerwerb im Alpentourismus: Handlungspotentiale und Entscheidungshilfen*. Springer VS.

Bätzing, W. (2015). *Die Alpen: Geschichte und Zukunft einer europäischen Kulturlandschaft* (4., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage). Verlag C.H. Beck.

Blöschl, G. (2020). Hochwasser. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), *Extrema 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich* (S. 229–246). Vienna University Press.

Borter, P. (1999). *Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren: Methode* (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Hrsg.).

Bösmeier, A., & Glaser, R. (2020). Hochwasser und Hochwasserrisikomanagement. In H. Gebhardt, R. Glaser, U. Radtke, P. Reuber, & A. Vött (Hrsg.), *Geographie: Physische Geographie und Humangeographie* (3. Auflage, S. 608–613). Springer.

Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS. (2020). *Hochwasser*.
<https://www.babs.admin.ch/de/aufgabenbabs/gefaehrdrisiken/natgefaehrdanalyse/gefaehrddossier.html#ui-collapse-794>

Bundesministerium für Inneres. (2018). *Risikomanagement im Katastrophenmanagement: Leitfaden*.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (o. J.). *Hochwasserereignisse*. Abgerufen 20. Februar 2024, von
<https://www.bmk.gv.at/themen/verkehr/wasser/hochwasserschutz/ereignisse.html>

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft. (o. J.). *Die Wildbach- und Lawinenverbauung*. Leben mit Naturgefahren. Abgerufen 24. März 2024, von
<https://www.naturgefahren.at/naturgefahrenmanagement/diewildbachundlawinenverbauung.html>

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft. (2015). *Technische Richtlinien für die Wildbach- und Lawinenverbauung*.

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft. (2023). *Gefahrenzonenpläne als präventive Maßnahme*. Leben mit Naturgefahren.
<https://www.naturgefahren.at/naturgefahrenmanagement/gefahrenzonenplaene.html>

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Region und Wasserwirtschaft. (o. J.). *Technische Schutzmaßnahmen—Schutzbauwerke*. Leben mit Naturgefahren. Abgerufen 20. April 2024, von
<https://www.naturgefahren.at/naturgefahrenmanagement/technischeschutzmassnahmen.html>

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft. (o. J.). *WRG-Gefahrenzonenplanungsverordnung - WRG-GZPV*. Abgerufen 13. April 2024, von

https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasser-oesterreich/wasserrecht_national/planung/wrg-gzpv.html

Crichton, D. (1999). The Risk Triangle. In J. Ingleton & Deutsches IDNDR-Komitee für Katastrophenvorbeugung (Hrsg.), *Natural disaster management: A presentation to commemorate the International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR), 1990—2000*. Tudor Rose.

Das geowissenschaftliche Portal für Baden-Württemberg | LGRBwissen. (o. J.). *Murgangähnliche Ereignisse (Fließen)* Abgerufen 4. Januar 2024, von <https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/ingenieurgeologie/massenbewegungen/murgangaehnliche-ereignisse-fliesen>

Dikau, R., & Glade, T. (2001). *Gravitative Massenbewegungen—Vom Naturereignis zur Naturkatastrophe*. Petermanns Geographische Mitteilungen, 145, 43–55.

Dikau, R., & Weichselgartner, J. (2005). *Der unruhige Planet: Der Mensch und die Naturgewalten*. Primus-Verl.

Dikau, R., Weichselgartner, J., & Hufschmidt, G. (2020). Gefahren-Risiken-Katastrophen. In H. Gebhardt, R. Glaser, U. Radtke, P. Reuber, & A. Vött (Hrsg.), *Geographie: Physische Geographie und Humangeographie* (3., [überarbeitete und erweiterte] Auflage, S. 1101–1142). Springer.

European Avalanche Warning Services (EAWS). (2023). *Lawinenvorhersage | Lawinen.report*. <https://lawinen.report/bulletin/2023-12-23>

Elverfeldt, K., Glade, T., & Dikau, R. (2008). Naturwissenschaftliche Gefahren- und Risikoanalyse. In C. Felgentreff & T. Glade (Hrsg.), *Naturrisiken und Sozialkatastrophen* (S. 31–45). Springer.

Fink, T. (2018). Verlagerungsprozesse in Wildbächen—Was sollen technische Schutzmaßnahmen leisten? In Universität für Bodenkultur Wien (Hrsg.), *Stand der Technik im Naturgefahren-Ingenieurwesen: Schriftreihe des Departments*.

Forzieri, G., Cescatti, A., Silva, F. B. e, & Feyen, L. (2017). Increasing risk over time of weather-related hazards to the European population: A data-driven prognostic study. *The Lancet Planetary Health*, 1(5), e200–e208. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30082-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30082-7)

Frei, C., Hohmann, R., & Pfister, C. (2003). Extremereignisse, Naturgefahren und Naturkatastrophen: Eine Begriffserklärung. In Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung (Hrsg.), *Extremereignisse und Klimaänderung* (S. 14–15). OcCC.

GBA MapViewer—Massenbewegungen in Österreich. (2022). GeoSphere Austria (Geologische Bundesanstalt).

https://gisgba.geologie.ac.at/gbaviewer/?url=https://gisgba.geologie.ac.at/ArcGIS/rest/services/AT_GBA_MASSENBEWEGUNGEN/MapServer

Gebhardt, H., Glaser, R., Radtke, U., Reuber, P., & Vött, A. (Hrsg.). (2020). *Geographie: Physische Geographie und Humangeographie* (3., [überarbeitete und erweiterte] Auflage). Springer.

GeoSphere Austria. (o. J.). *Alpenraum—ZAMG*. Abgerufen 28. August 2023, von <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimazukunft/alpenraum>

GeoSphere Austria. (2023). *AUSTRIAN MULTI-HAZARD IMPACT BASED ADVICE SERVICES — ZAMG*. GeoSphere Austria (Geologische Bundesanstalt). https://www.zamg.ac.at/cms/de/aktuell/news/amas_initiative

GeoSphere Austria. (2023). *Wärmstes Jahr der Messgeschichte*. GeoSphere Austria - Bundesanstalt für Geologie, Geophysik, Klimatologie und Meteorologie. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/waermstes-jahr-der-messgeschichte-1>

Gill, J. C., & Malamud, B. D. (2014). Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards: Interactions of Natural Hazards. *Reviews of Geophysics*, 52(4), 680–722. <https://doi.org/10.1002/2013RG000445>

Glade, T., & Pöpl, R. (2013). Naturgefahren- und Risikoforschung im Alpenraum. Einige Grundlagen. *Geographie und Schule*, 204(35), 4–11.

Glade, T., & Stötter, J. (2008). Gravitative Massenbewegungen und Schneelawinen. In *Naturrisiken und Sozialkatastrophen* (S. 151–197).

Glade, T., Tilch, N., & Kociu, A. (2020). Extreme bei Hangrutschungen und Hangmuren. In *Extrema 2019: Aktueller Wissenstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich* (S. 416–483). Vienna University Press.

Hochrainer-Stigler, S., Bachner, G., Knittel, N., Poledna, S., Reiter, K., & Bosello, F. (2024). *Risk management against indirect risks from disasters: A multi-model and participatory governance framework applied to flood risk in Austria*. International Journal of Disaster Risk Reduction, 106, 104425. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104425>

Hübl, J., Kienholz, H., & Loipersberger, A. (Hrsg.). (2006). *DOMODIS - Dokumentation alpiner Naturereignisse (Documentation of Mountain Disasters)*. Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT.

Institut für Schnee und Lawinenforschung (SLF). (o. J.). *Gefahrenstufen*. WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF. Abgerufen 6. Januar 2024, von <https://www.slf.ch/de/lawinenbulletin-und-schneesituation/wissen-zum-lawinenbulletin/gefahrenstufen/>

IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In The Core Writing Team, H. Lee, & J. Romero (Hrsg.), *Climate Change 2023: Synthesis Report*. (Intergovernmental Panel on Climate Change).

Jöbstl, H.-L. S., Cornelia. (2024). *Gefahrenzonenpläne*. Hochwasserinformation - Land Steiermark. <https://www.hochwasser.steiermark.at/cms/ziel/142693618/DE/>

Kaitna, R., Prenner, D., & Hübl, J. (2020). Muren. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), *Extrema 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich* (S. 492–506). Vienna University Press.

Kappes, M. S., Keiler, M., Von Elverfeldt, K., & Glade, T. (2012). Challenges of analyzing multi-hazard risk: A review. *Natural Hazards*, 64(2), 1925–1958. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0294-2>

Kappes, M. S., Papathoma-Köhle, M., & Keiler, M. (2012). Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, 32(2), 577–590. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.07.002>

Kienholz, H. (2005). Analyse und Bewertung alpiner Naturgefahren: Eine Daueraufgabe im Rahmen des integralen Risikomanagements. *Geographica Helvetica*, 60(1), 3–15. <https://doi.org/10.5194/gh-60-3-2005>

Kundzewicz, Z. W. (Hrsg.). (2012). *Changes in flood risk in Europe*. International association of hydrological sciences.

Kuttler, W. (2013). *Klimatologie* (2., aktualisierte und erg. Aufl). Schöningh.

Maraun, D., & Jury, M. (2022). Der Klimawandel und Naturgefahren im Alpenraum. *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz*, Heft Nr. 190, 38–49.

Neuhold, C., & Stiefelmeyer, H. (2023). *Technische Richtlinien für den Wasserbau (TRL-WB 23)*.

Plattform Naturgefahren der Alpenkonvention (PLANALP) (Hrsg.). (2010). *Schutz vor Naturgefahren in Österreich*.

Pohl, J. (2008). Die Entstehung der geographischen Hazardforschung. In C. Felgentreff & T. Glade (Hrsg.), *Naturrisiken und Sozialkatastrophen* (S. 47–60). Springer.

Pöppl, R., & Sass, O. (2020). Multi-Hazards und Kaskadeneffekte. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), *Extrema 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. (S. 606–618). Vienna University Press.

Preh, A., Mölk, M., & Illeditsch, M. (2020). Steinschlag und Felssturz. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), *Extrema 2019: Aktueller Wissenstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich* (S. 425–456). Vienna University Press.

RIS - ForstG-Gefahrenzonenplanverordnung—Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 13.04.2024. (2024).

<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011506>

Rudolf-Miklau, F. (2009). *Naturgefahren-Management in Österreich: Vorsorge, Bewältigung, Information*. LexisNexis.

Rudolf-Miklau, F. (2018). *Umgang mit Naturkatastrophen* (1. Ausgabe). Linde Verlag Ges.m.b.H.

Rudolf-Miklau, F., & Rimböck, A. (2016). Komplexe Schutzsysteme gegen Naturgefahren: Systemdesign und Lebenszyklusmodell. *Bautechnik*, 93(12), 875–884. <https://doi.org/10.1002/bate.201600026>

Sattler, K., & Mehlhorn, S. (2020). Überblick alpiner Naturgefahren in Österreich. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), *Extrema 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*. (S. 45–56). Vienna University Press.

Schindelegger, A. (2019). *Naturgefahren Risiko-Governance Alpenzustandsbericht*. Ständiges Sekretariat der Alpenkonvention.

Schoepfer, E., Juzam Pucheu, L., Lauterjung, J., León, C. D., Riedlinger, T., Spahn, H., & Zambrano, A. (2024). *Policy brief - Multi-risk analysis: What would happen if...?* [Application/pdf]. German Aerospace Center. <https://doi.org/10.15489/CWGICMTCJA61>

Sellke, P., & Renn, O. (2018). Risiko Governance: Ein neuer Ansatz zur Analyse und zum Management komplexer Risiken. In F. Rudolf-Miklau & A. Kanonier (Hrsg.), *Regionale Risiko Governance: Recht, Politik und Praxis* (S. 3–33). Verlag Österreich GmbH.

Ständiges Sekretariat der Alpenkonvention (Hrsg.). (2015). *Demographischer Wandel in den Alpen: Alpenzustandsbericht*.

Studeregger, A., Podesser, A., Mitterer, C., Fischer, J.-T., Ertl, W., Nairz, P., & Mair, R. (2020). Lawinen. In T. Glade, M. Mergili, & K. Sattler (Hrsg.), *ExtremA 2019: Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich* (S. 511–531). Vienna University Press.

Terzi, S., Torresan, S., Schneiderbauer, S., Critto, A., Zebisch, M., & Marcomini, A. (2019). Multi-risk assessment in mountain regions: A review of modelling approaches for climate change adaptation. *Journal of Environmental Management*, 232, 759–771. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.100>

Thaler, T., Attems, M.-S., & Fuchs, S. (2018a). Neue gesellschaftliche Herausforderungen im Naturgefahrenmanagement: Welche Entwicklungen kommen auf uns zu? *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 70(3–4), 230–235. <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0468-6>

Thaler, T., Attems, M.-S., & Fuchs, S. (2018b). Neue gesellschaftliche Herausforderungen im Naturgefahrenmanagement: Welche Entwicklungen kommen auf uns zu? *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 70(3–4), 230–235. <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0468-6>

Titz, A., Grießinger, J., & Raven, S. (2016). Naturgefahren und Naturgefahrenmanagement im Oberen Paznauntal/Tirol. *Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft*, 61/62, Article 61/62.

Traxler, T. (2023, August 8). *Warum künftig mehr Hangrutschungen zu befürchten sind*. DER STANDARD. <https://www.derstandard.at/story/3000000181991/warum-kuenftig-mehr-hangrutschungen-zu-befuerchten-sind>

UBA. (2007, November 26). *ClimChAlp—Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the Alpine Space*. Umweltbundesamt; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/werkzeuge-der-anpassung/projektkatalog/climchalp-climate-change-impacts-adaptation>

UFAM. (2023). *Risikoermittlung und -bewertung*. Bundesamt für Umwelt BAFU. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-naturgefahren/naturgefahren--fachinformationen/naturgefahren--risikoermittlung-und--bewertung.html>

UFAM. (2024). *Gefahrenkarten, Intensitätskarten und Gefahrenhinweiskarten*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-naturgefahren/naturgefahren--fachinformationen/naturgefahrensituation-und-raumnutzung/gefahrengrundlagen/gefahrenkarten--intensitaetskarten-und-gefahrenhinweiskarten.html>

UNDRR. (2016). *Terminology | UNDRR*. <http://www.undrr.org/terminology/hazard>

UNDRR. (2017, Februar 2). *Disaster management | UNDRR*. <http://www.undrr.org/terminology/disaster-management>

United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2009). *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*. <https://www.undrr.org/publication/2009-unisdr-terminology-disaster-risk-reduction>

United Nations Office for Disaster Risk Reduction and World Meteorological Organization (Hrsg.). (2023). *Global Status of Multi-Hazard Early Warning System 2023*.

Van Westen, C. J., & Greiving, S. (2017). Multi-hazard risk assessment and decision making. In N. R. Dalezios (Hrsg.), *Environmental Hazards Methodologies for Risk Assessment and Management* (S. 31–91). IWA Publishing.

Veit, H. (2002). *Die Alpen: Geoökologie und Landschaftsentwicklung*. E. Ulmer.

Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs (Hrsg.). (2022). *Naturgefahren im Klimawandel: Bd. Heft Nr. 190*. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz.

Werthmüller, C. (2018). *Naturgefahren im Alpenraum - Vor- und Nachsorge durch die Raumordnung: Versuch einer kritischen Bilanz* (K. Goppel & G. Troeger-Weiß, Hrsg.). Universität Augsburg Technische Universität Kaiserslautern.

Wieshofer, S., Scheidl, C., & Kurz, D. (2003). *Optimierung der Lawinensicherung in Skigebieten—Fallbeispiel in Lech und St. Anton/Rendl Endbericht*. Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, Report Nr. 84.