

MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Frühwarn- und Monitoringsysteme von Muren - eine Analyse in
Österreich

verfasst von | submitted by
Paula Wallisch 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 199 510 511 02

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

Masterstudium Lehramt Sek (AB) Unterrichtsfach
Geographie und wirtschaftliche Bildung
Unterrichtsfach Geschichte und Politische Bildung

Betreut von | Supervisor:

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

Danksagung

Zunächst gebührt mein Dank meinem Betreuer, Univ.-Prof. Dipl.-Geogr. Dr. Thomas Glade, für seine fachliche Anleitung, Unterstützung und wertvollen Ratschläge, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank geht auch an die Dienststelle Wildbach- und Lawinenverbauung, insbesondere an DI Dr. Florian Rudolf-Miklau, für die bereitgestellten Ressourcen und die fachkundige Unterstützung, die eine unverzichtbare Grundlage für meine Arbeit darstellt. Gleichfalls möchte ich DI Markus Moser, DI Thomas Frandl und DI Siegfried Pöll für ihre fachmännische Beratung danken. Dank gebührt ebenso Hartmut Neurauter von der Straßenmeisterei Zams, Amt der Tiroler Landesregierung, für die ausführliche Erklärung zum Ablauf der Warnkommunikation.

Ich möchte mich ebenso bei Mag. Dr. Marc Ostermann und Dr. Harald Schellander von der Bundesanstalt für Geologie, Geophysik, Klimatologie und Meteorologie sowie bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Johannes Hübl von der Universität für Bodenkultur Wien für ihre Expertise und Hilfsbereitschaft bedanken. Ferner nutze ich diese Gelegenheit, um mich bei DI Dr. techn. Richard Koschuch. und bei Dipl.-Ing. Dr. Andreas Schimmel für die bereitwillige Unterstützung zu bedanken. Schließlich möchte ich meiner Familie und meinen Freunden meine Wertschätzung und meinen Dank für ihre Ermutigung aussprechen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	V
Abbildungsverzeichnis	VI
Kurzfassung	VII
Abstract.....	VIII
1. Einleitung	1
2. Forschungsfragen und Hypothesen	3
3. Methodik	4
4. Früherkennungsmodalitäten gravitativer Massenbewegungen: ein umfassender Überblick.....	6
4.1 Globale Praktiken der Früherkennung gravitativer Naturgefahren.....	6
4.2 Grenzüberschreitende Kooperation	9
4.3 Aktueller Forschungs- und Entwicklungsstand in Österreich	12
5. Bestandteile und Funktionsmechanismen von Frühwarn- und Monitoringsystemen.	15
5.1 Messsensoren	20
<i>5.1.1 Geophone und Seismometer</i>	<i>21</i>
<i>5.1.2 Radarmessgeräte und Hochfrequenz-Radar.....</i>	<i>22</i>
<i>5.1.3 Ultraschall.....</i>	<i>23</i>
<i>5.1.4 Laserscanner</i>	<i>23</i>
<i>5.1.5 Drahtsensoren und Reißleinen</i>	<i>24</i>
<i>5.1.6 Sonstige</i>	<i>24</i>
<i>5.1.7 Stärken und Schwächen der Messsensoren</i>	<i>25</i>
5.2 Vorhersage meteorologischer Parameter mittels INCA-System	27
5.3 Erkennung und Identifizierung von Murgängen mittels MAMODIS-System	29
5.4 Sensorbasierte Überwachung mittels AMM-System.....	30
6. Einflussfaktoren auf Muren: Geologie, Klima und Mensch	32
6.1 Gefahrenprofil in Österreich	33
6.2 Auslösefaktoren.....	34
6.3 Position der Messgeräte und geologische Merkmale der Einzugsgebiete	37

7. Fallbeispiele von Frühwarn- und Monitoringsystemen für Muren.....	41
7.1 Lattenbach	42
7.2 Suggadinbach/Mäßtobel	47
7.3 Erkenntnisse aus den Fallbeispielen	51
7.4 Endnutzerzentrierte Frühwarnsysteme	52
8. Identifikation von Problemfeldern und Verbesserungspotenzialen	54
9. Conclusio	59
10. Zusammenfassung.....	62
11. Ausblick	63
Literaturverzeichnis.....	65
Anhang	74

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AMM	Automatic Detection of Alpine Mass Movements
BML	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft
BOKU	Universität für Bodenkultur Wien
bzw.	beziehungsweise
et al.	et alii
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
IAN	Institut für Alpine Naturgefahren
ILEWS	Integrative Landslide Early Warning Systems
INADEF	Innovative Nowcasting based early wArning system for DEbris Flow events
INCA	Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis
LEWS	Landslide Early Warning Systems
LiDAR	Light Detection and Ranging
MAMODIS	Mass Movement Detection and Identification System
o.J.	ohne Jahr
o.O.	ohne Ort
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
u.a.	unter anderem
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
v.a.	vor allem
WLV	Institut für Wildbach- und Lawinenverbauung
z.B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Wahrnehmungskette, Monitoring und Warnung. (HÜBL & MATJAŽ 2014: 52)	19
Abbildung 2 - Bedarfsanalyse für Frühwarnsysteme von Muren. (Eigene Darstellung; adaptiert nach TRIGG 2014)	20
Abbildung 3 - Karte der Testgebiete seit 2013. (HÜBL et al. 2016: 7).....	30
Abbildung 4 - Übersicht des Einzugsgebietes und der Monitoringstationen in Farstrinne und der Position des Detektionssystems. (HÜBL et al. 2016: 8).....	31
Abbildung 5 - Übersicht des Einzugsgebietes und der Monitoringstationen in Dristenau und der Position des Detektionssystems. (HÜBL et al. 2016: 11).....	31
Abbildung 6 - Räumliche Verteilung der Wildbachereignisse in Österreich. (DRAGOVIĆ et al. 2022: 45; siehe auch HÜBL et al. 2009: 57).....	34
Abbildung 7 - Start-, Übergangs- und Ablagerungsbereich. (KIENHOLZ 2003: 559; siehe auch HÜBL et al. 2014: 10)	38
Abbildung 8 - Zuverlässigkeit und Reaktion der Frühwarnung in Abhängigkeit vom Standort des Alarmgeräts. (KIENHOLZ 2003: 560; siehe auch HÜBL et al. 2014: 11)..	39
Abbildung 9 - Geografische Lage des Einzugsgebiets Lattenbach. (HÜBL et al. 2003: 2)	42
Abbildung 10 - Monitoringstelle am Mäßtobel. (OSTERMANN & AMABILE 2019: 20)	47
Abbildung 11 - SMS: Information über die Ampelschaltung. (NEURAUTER 2023).....	75
Abbildung 12 - Das Hochfrequenz-Radar und die Einteilung der Rangegates. (SCHÖFFL & HÜBL 2020: 6).....	76
Abbildung 13 - Komponente des Frühwarnsystems am Dawinbach. (SCHÖFFL et al. 2020: 185)	76
Abbildung 14 - Prinzip des Monitoringsystems am Lattenbach. (HÜBL et al. 2003: 7) .	77
Abbildung 15 - Ampel auf der Gargellener Straße. (JÄGER & SCHMIDT 2006: 298) .	78
Abbildung 16 - Mit UAV erstelltes Geländemodell des Messbereiches. (CHIARI et al. 2016: 54)	78

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Analyse von Frühwarn- und Monitoringsystemen für Muren in Österreich. Gravitative Massenbewegungen sind eine der vielen potentiellen Naturgefahren, die in der alpinen Landschaft Österreichs eine Bedrohung und Herausforderung für verschiedene Akteurgruppen darstellen. Katastrophenvorsorge erhält somit einen hohen Stellenwert, darunter fallen etwa auch Messsysteme zur Früherkennung derartiger Naturkatastrophen und der Versuch einer Schadensminderung durch Warnung.

Das Ziel der Arbeit ist ein vertieftes Verständnis für die Funktionsweise dieser Systeme zu entwickeln und welche Faktoren ihre Wirksamkeit beeinflussen, um somit mögliche Verbesserungspotenziale aufzuzeigen. Zur Vertiefung des Wissens werden die globalen Ansätze der Früherkennungsmethoden derartiger Naturphänomene sowie der aktuelle Forschungs- und Entwicklungsstand in Österreich erörtert. Beleuchtet werden soll, nebst allgemeinen Grundlagen, auch der gegenwärtige Ist-Zustand der Inbetriebnahme von Frühwarn- und Monitoringanlagen in Gebieten Österreichs mit hoher Murenaktivität und, welchen Herausforderungen man in der Praxis begegnet.

Im Fokus der Analyse stehen ausgewählte Frühwarn- und Monitoringsysteme und damit verbundene Aspekte wie unterschiedliche Messtechniken, Anlagespezifikationen, Gestaltung der Warnmitteilung und Nutzeranpassung. Die Untersuchung ermöglicht es, die Bandbreite und Vielfalt der Ansätze in der Muren-Frühwarnung zu erfassen. Die Ergebnisse der Arbeit werden durch hier ausgewertete Erfahrungsberichte untermauert. Diese Berichte bieten wertvolle Einblicke in die praktische Anwendung und Wirksamkeit der Frühwarnsysteme in realen Szenarien und tragen damit wesentlich zum Verständnis der Leistungsfähigkeit dieser Systeme und zur Identifikation von Verbesserungspotenzialen bei.

Stichwörter: Frühwarnsystem; Monitoringanlage; Mure; Risikomanagement; Messsensor; Warnprozess; Naturgefahr

Abstract

The present study focuses on the analysis of early warning and monitoring systems for debris flows in Austria. Gravitational mass movements are one of many potential natural hazards in Austria's alpine landscape, posing a threat and challenge to various stakeholder groups. Thus, disaster prevention is of high importance, including measurement systems for early detection of such natural catastrophes and attempts to reduce damage through warnings.

The aim of the paper is to develop a deeper understanding of how these systems work and what factors influence their effectiveness, thereby identifying potential areas for improvement. To deepen knowledge, global approaches to early detection methods for such natural phenomena and the current state of research and development in Austria are discussed. In addition to general fundamentals, the current operational state of early warning and monitoring systems in areas of Austria with high debris flow activity will be examined, along with the challenges encountered in practice.

The focus of the analysis is on selected early warning and monitoring systems and associated aspects such as different measurement techniques, system specifications, design of warning modalities and user adaptation. The examination allows capturing the range and diversity of approaches in debris flow early warning. The results of the study are substantiated by evaluated experience reports. These reports provide valuable insights into the practical application and effectiveness of the early warning systems in real scenarios, thereby significantly contributing to the understanding of the performance and reliability of these systems.

Keywords: early warning system; monitoring; debris flow; risk management; disaster prevention; measurement sensor; warning process; natural hazard

1. Einleitung

Der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist ein von Menschenhand erzeugtes Instrument zur frühzeitigen Erkennung potenzieller Gefahr im Naturraum. In Österreich verursachen Naturkatastrophen wie Hochwasser, Bergrutschungen, Lawinen und Wildbäche jährlich erhebliche Schäden und ziehen weitreichende mediale Aufmerksamkeit auf sich – insbesondere im Rahmen des aktuellen Diskurses zur Klimakrise. Ein Großteil der österreichischen Gemeinden ist in unterschiedlichem Maße von solchen Gefahren betroffen, daher gehören die Alarmierung, die Prävention von Katastrophen, deren Bewältigung sowie die Informierung der Öffentlichkeit zu den zentralen Aufgaben der kommunalen Sicherheitsverantwortung (RUDOLF-MIKLAU 2018).

Extremereignisse werden nicht zwingend an ihrer Stärke, sondern am verursachten Schaden gemessen. Frühwarnsysteme können dazu beitragen, den Schaden zu minimieren, indem sie beispielsweise Einsatzkräfte zur Handlung animieren. Davon sind allem voran Menschen und ihr Lebensraum betroffen. Gefährdete Bereiche sind Infrastruktur, wie Straßen und das Verkehrsnetz, landwirtschaftliche Flächen sowie der Tourismus- und Freizeitsektor, z.B. in Bundesländern wie Tirol und Vorarlberg (BML o.J.). Allein in Österreich finden sich um die 12.500 Wildbacheinzugsgebiete, in denen u.a. Muren zu den bedrohlichen Naturphänomenen zählen (ebd.). Kleinere Schadensfälle können oft mit lokalen Hilfskräften gemeistert werden, während Großkatastrophen zu massiven Verlusten an Menschenleben, Sachwerten und Umweltschäden führen und die wirtschaftliche sowie soziale Struktur einer Gemeinde stark beeinträchtigen können, oft über deren Bewältigungskapazitäten hinaus (RUDOLF-MIKLAU 2018).

In Österreich werden viele Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren auf Gemeindeebene umgesetzt, wobei die Gemeinden als Hauptverantwortliche für diese Schutzleistungen fungieren. Einige dieser Schutzmaßnahmen als Teile des Vorsorgekreislaufs, wie Blitzableiter oder Schutzbauwerke, können von der Gemeinde selbständig entschieden und kommuniziert werden. Komplexere Maßnahmen, wie Monitoring- und Frühwarnsysteme für Naturkatastrophen, erfordern hingegen spezialisiertes Fachwissen und die Konsultation von Experten*innen aus Bundes- und Landesinstitutionen oder technischen Büros. Somit ist ein Frühwarnsystem das Ergebnis der Zusammenarbeit mehrerer Entscheidungsträger*innen, je nach Art der potenziellen Naturgefahr verschieden konzipiert und kann in Kombination mit verschiedenen schadensmindernden Präventionsmodellen in der Praxis umgesetzt werden (ebd.). Der aktuelle Diskurs

zum Klimaschutz und zur Klimawandelanpassung betont die Notwendigkeit, sich auf die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels vorzubereiten, selbst wenn aus statistischer Sicht kein starker Anstieg von Phänomenen wie zerstörerischen Murgängen zu verzeichnen ist. Daraus resultiert, dass der Schwerpunkt auf die Entwicklung von resilienten Prävention- und Schutzsystemen gesetzt werden muss – dies erfordert einen umfassenden Ansatz, der über traditionelle Schutzmaßnahmen hinausgeht und Modelle wie Frühwarn- und Monitoringsysteme von Muren für ein robustes Katastrophenmanagement umfasst (KAITNA 2022a).

Frühwarnsysteme tragen signifikant zur Informationsvermittlung und Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung bezüglich Naturgefahren und den zugehörigen Reaktionsstrategien bei. Sie fungieren als essentielle Instrumente im Rahmen der Risikokommunikation, indem sie nicht nur rechtzeitige Warnungen vor bevorstehenden Gefahrenereignissen bereitstellen, sondern auch das Verständnis und die Kenntnis über adäquate Verhaltensweisen und Maßnahmen in der Bevölkerung fördern (SÄTTELE & BRÜNDL 2015). Derzeit gibt es nur eine Handvoll solcher Frühwarnanlagen in Österreich. Außerdem zeigen einige der Anlagen Störfaktoren, die den Prozess komplizieren, wie z.B. technische Messfehler, wo noch Verbesserungsbedarf herrscht (RUDOLF-MIKLAU 2023). Insofern leistet diese Arbeit ihren Beitrag, indem sie Variablen analysiert, die zeigen sollen, was bei Frühwarn- und Monitoringsystemen von Muren wichtig ist, damit diese in der Praxis funktionieren. Am Forschungsinstitut für Geo-Hydrologischen Schutz (Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica – IRPI) der Universität Padua, einem Teil des Italienischen Nationalen Forschungsrats (Consiglio Nazionale delle Ricerche – CNR), behandelt der Forscher Velio Coviello das Thema nach den Gesichtspunkten der jüngsten Fortschritte, offener Probleme und zukünftiger Herausforderungen für Frühwarnsysteme zur Früherkennung von Murereignissen (COVIELLO 2023).

Im Laufe der Arbeit werden unterschiedliche Projekte und Studien in diese Richtung aufgegriffen, wie beispielsweise das INADEF-Projekt (HAGEN et al. 2022). Es folgt eine genauere Betrachtung der Schlüsselkomponenten von Frühwarnsystemen und mit welchen Messtechniken diese zum Einsatz kommen. Schlussendlich werden Fallbeispiele von Muren-Frühwarn- und Monitoringsystemen in Österreich, u.a. anhand von Erfahrungsberichten der WLV in Zusammenarbeit mit verschiedenen Disziplinen, aufgezeigt. Der Aspekt der Optimierung für die Endnutzer*innen dieser Systeme, wie beispielsweise aus dem Verbundprojekt zu ILEWS ersichtlich (BELL et al. 2010a), wird ebenso näher thematisiert.

2. Forschungsfragen und Hypothesen

Im Mittelpunkt des Forschungsrahmens stehen die Fragen, inwiefern sich die Frühwarn- und Monitoringsysteme von Muren in österreichischen Einzugsgebieten hinsichtlich ihres Messkonzepts unterscheiden und welche Faktoren ihre Wirksamkeit beeinflussen. Im Fokus dieser Untersuchung steht die systematische Erfassung der unterschiedlichen Messsensoren und Datenerfassungsmethoden, mit denen die jeweiligen Systeme operieren. Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines tiefgreifenden Verständnisses über deren Funktionsmerkmale, Stärken und Schwächen. Anhand einer Analyse zweier Fallbeispiele sollen diese Punkte praxisnah dargelegt werden. Zusätzlich ist die Identifizierung verschiedener Faktoren, welche die Effektivität der Systeme beeinflussen, ein Anliegen dieser Arbeit, um auch mögliche Verbesserungsaspekte aufzuzeigen. Diese beschränken sich nicht nur auf den technischen Aspekt, sondern berücksichtigen ebenso weitere Bedingungen. Dazu werden folgende Hypothesen formuliert:

Hypothese 1: Frühwarnsysteme von Muren sind nicht einheitlich, sondern müssen an lokale natürliche und gesellschaftliche Gegebenheiten angepasst werden.

Die vorliegende *Hypothese 1* postuliert, dass die Effektivität von Muren-Frühwarnsystemen wesentlich von ihrer Anpassung an lokale natürliche und gesellschaftliche Gegebenheiten abhängt, was eine Abkehr von einem standardisierten Ansatz impliziert. Die Überprüfung dieser Hypothese zielt darauf ab, die Notwendigkeit eines interdisziplinären Ansatzes in der Entwicklung derartiger Systeme hervorzuheben.

Hypothese 2: Ein effektives Frühwarnsystem für Muren muss eine eindeutige, nutzerangepasste Alarmkommunikation beinhalten.

Hypothese 2 stellt die Prämisse auf, dass die Wirksamkeit von Muren-Frühwarnsystemen entscheidend von der Implementierung einer eindeutigen und auf die Nutzergruppe abgestimmten Alarmkommunikation abhängt, wobei die nutzerzentrierte Anpassung eine Schlüsselrolle für das Verständnis von Warnungen spielt. Diese Hypothese zielt darauf ab, den Forschungsschwerpunkt in Richtung benutzerzentrierter Kommunikationstechnologien zu lenken.

3. Methodik

Die hier vorliegende Arbeit ist theoretisch-konzeptionell ausgerichtet. Insofern wurde als Methodik Literaturrecherche gewählt, die sowohl rückwärtsgerichtete als auch vorwärtsgerichtete Ansätze beinhaltet. Durch die Kombination beider Ansätze soll sichergestellt werden, dass einerseits bereits veröffentlichte Texte, die direkt mit dem Forschungsthema in Verbindung stehen, analysiert werden. Andererseits sollen nicht nur Schlüsselpublikationen, sondern auch aus den ursprünglichen Quellen resultierende Referenzen berücksichtigt werden, die aktuelle Entwicklungen und Projekte identifizieren. Das Ziel war das Finden und Auswerten von Inhalten, die sich spezifisch auf die Hypothesen der Arbeit konzentrieren und eine ausführliche Übersicht zu den Frühwarn- und Monitoringanlagen für Muren bieten.

Zu Beginn wurde eine computergestützte Literatursuche in dem elektronischen Bibliothekskatalog der Universität Wien (u:search) und über diverse Suchmaschinen wie ResearchGate, Scopus und Google Scholar sowie auf der Internetseite des wissenschaftlichen Verlags Springer durchgeführt. Zunächst wurde mittels Schlüsselbegriffen wie „gravitative Massenbewegung“, „Frühwarnsystem“, „Frühwarnanlage“, „Monitoringanlage“ und „Naturgefahr“ gesucht, die sehr allgemeine Resultate brachten. Da „Frühwarnsysteme“ und „Monitoringsysteme“ nicht nur in der Physiogeographie vorkommen, sondern auch beispielsweise im Gesundheitswesen oder im Unternehmensmanagement, musste die Suche eingegrenzt werden. Im weiteren Schritt wurde dann konkreter mit Wortgruppen recherchiert, z.B. nach „Frühwarnsystem Muren Österreich“ bzw. in englischer Version nach „early warning system for debris flows Austria“, was inhaltlich der Zielsetzung besser entsprach. In den Suchprozess einbezogen wurden Berichte, Fachzeitschriften, wissenschaftliche Journals wie *Natural Hazards and Earth System Sciences* und *International Journal of Geo-Information*, Artikel, Konferenzbeiträge und Bücher sowohl in deutscher als auch in englischer Sprache. Eine wichtige Grundlage für die Masterarbeit bilden ebenso Publikationen von LandAware, vom Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung und von der Geologischen Bundesanstalt sowie aus der Datenbank der Universität für Bodenkultur Wien, z.B. IAN-Report Nr. 147 (HÜBL et al. 2016).

Einige als relevant erachtete Zusatzinformationen wurden von Fachleuten der WLV, GeoSphere Austria, Gebietsbauleitungen und Straßenmeistereien aus den jeweiligen Einzugsgebieten, eingeholt. Diese sind aus der persönlichen Kommunikation via E-Mail dementsprechend im Text

zitiert. Graphiken, die sich für die Erklärung bestimmter Vorgänge gut eignen oder die Installation der Anlagen exemplarisch erfassen, sind ein Bestandteil der Arbeit.

Die selektierte Literatur – teilweise digital und teilweise physisch von Fachbibliotheken ausgeliehen bzw. eingescannt – wurde folgendermaßen bearbeitet: Als Einstieg erfolgte eine systematische Analyse der Inhaltsverzeichnisse der relevanten Publikationen, um die Übereinstimmung ihrer Kernthemen mit dem Forschungsgegenstand zu evaluieren. Diese Evaluation zielte darauf ab, zu ermitteln, inwieweit die Inhalte der Publikationen entweder allgemeine Aspekte gravitativer Massenbewegungen abdecken oder sich konkret auf Murgänge konzentrieren. Bei PDF-Versionen von Sammelwerken, wie z.B. ExtremA 2019 (GLADE et al. 2019), war die Recherche nach Informationen innerhalb des Textes einfacher, da die digitale Suchfunktion zum Einsatz kam. Insofern wurden in der Suchfunktion Silben wie „mur-“ eingetippt, um auch verwandte Wörter wie „Murgänge“, „Murenaktivität“ oder „Hangmure“ statt nur „Mure“ zu berücksichtigen. Sobald die Ergebnisse dementsprechend gefiltert waren, wurden die Kapitel durchgelesen und zutreffende Inhalte hier zitiert. Bei der Verifizierung von vorhandenen Informationen wurde auf den Querverweis geachtet. Textpassagen aus verschiedenen Quellen, die gleiche oder ähnliche Schlüsselthemen behandeln, z.B. HAGEN & LECHNER 2020 und HAGEN et al. 2022, wurden zueinander in Beziehung gesetzt. Nicht berücksichtigt sind rein informatisch-mathematische Texte, die sich mit Programmiersprachen für Datenerfassungssysteme und mathematischen Funktionen auseinandersetzen.

Im Rahmen der Vorbereitungen für die Analyse wurde festgestellt, dass es keine Zustandsberichte ab dem Jahr 2019 gibt, deswegen ist die Annahme, dass diese gleichgeblieben sind – auf Anfrage bei der WLV kam die Rückmeldung, dass die Zahlen „*im Großen und Ganzen*“ noch aktuell seien (FRANDL 2024). Analysiert wurde wie folgt: Zunächst wurden Texte über die Einzugsgebiete Lattenbach und Suggadinbach/Mäßtobel gelesen und in einer chronologischen Struktur zusammengefasst. In den nächsten Schritten wurde überlegt, welche Kriterien in Hinblick auf die Zielsetzung der Arbeit eine Rolle spielen, und diese dann systematisch erfasst. Die Auswahl der praktischen Fallbeispiele wurde anhand der dazu vorhandenen Publikationsdichte und deren Aussagekraft getroffen. Die Herausforderung bei der Auseinandersetzung mit einzelnen Berichten zu den Anlagen bestand darin, diese in ein großes Gefüge zu integrieren, das mehrere Aspekte berücksichtigt und nicht nur auf temporären Daten oder reinen Empfehlungen fußt. Anzumerken ist, dass es sich bei den Systemen um kommerzielle Produkte handelt und der Informationsrückfluss auf Anfrage dementsprechend selektiv war.

4. Früherkennungsmodalitäten gravitativer Massenbewegungen: ein umfassender Überblick

Dieses Kapitel liefert eine Betrachtung allgemeiner Grundlagen, Praktiken und Modelle zur Früherkennung von gravitativen Massenverlagerungen, beleuchtet globale Ansätze sowie Entwicklungen in Österreich und diskutiert trans- und interdisziplinäre Aspekte der Kooperation.

4.1 Globale Praktiken der Früherkennung gravitativer Naturgefahren

Wenn als Beispiel Entwicklungsländer herangezogen werden, so kann gesagt werden, dass die Qualität und Art der Daten für Murgangvorhersagen durch diverse Herausforderungen beeinträchtigt sind. So behindern niedrige Investitionen oft die Ausarbeitung und Umsetzung dauerhafter Strategien, besonders in Überwachung und Datenverwaltung (BUDIMIR et al. 2022). Diese Problematik wird durch Entwicklungsengpässe, die mit Risiken von Konflikten und politischer Instabilität zusammenhängen, verstärkt, was wiederum zu reduzierten oder abgebrochenen Investitionen führt (ebd.). Der Übergang zu vorbeugenden Maßnahmen erfordert beträchtliche finanzielle Mittel, erhöhte Kapazitäten und spezialisierte Schulungen für das Personal. Außerdem setzen regelmäßige Katastrophenzyklen die Fortschritte in breiteren institutionellen Entwicklungen zurück. Projektorientierte Initiativen, die auf externer Finanzierung basieren, richten sich oft nach den Bedürfnissen der Geldgeberseite und sind daher weder nachhaltig noch langfristig oder in größerem institutionellen Rahmen nützlich. Anzumerken ist, dass die Zugänglichkeit der Daten einen primären Einfluss auf die Wahl der Früherkennungsmodalität von Muren besitzt (ebd.). Im Folgenden werden einige globale Zugänge beleuchtet:

- **Weltweite Installationspunkte und Anfälligkeitsmodelle**

In der globalen Landschaft der Frühwarnsysteme von mur-artigen Prozessen und Muren spiegeln sich die vielfältigen regionalen Gegebenheiten wider, wobei jedes Gebiet seine eigenen spezifischen Anforderungen aufweist. In Nordamerika kommen Detektionssysteme von Muren in Südkalifornien und in der überwiegend feuchten Klimazone von Seattle, Washington, sowie in der gemäßigt warmen Klimazone von North Vancouver, Kanada, zum Einsatz (STÄHLI et al. 2015). In Italien finden sich Frühwarnanlagen von Muren überwiegend in den Dolomiten, v.a. aufgrund von Veränderungen in der Bergstabilität. Japan, ein Land, das häufig von Naturkatastrophen betroffen ist, setzt im Nojiri-Flussbecken auf die Überwachung und Frühwarnung von Murgängen. In Taiwan

hingegen gibt es ein Insel-weites Netzwerk an Frühwarntechnologien. Schließlich existieren in der Schweiz ebenso Installationspunkte, insbesondere in den Regionen Susten und Guttannen (ebd.). Weitere Beispiele hierfür finden sich u.a. in Neuseeland, Indonesien, Großbritannien, Brasilien, China, Kolumbien, Deutschland und Norwegen (HEISTERKAMP et al. 2016; siehe auch HÜRLIMANN et al. 2019). Anfälligkeitsanalysen von Muren zeigen, dass ein universelles globales Modell in einem Großteil der Fälle entweder vergleichbare oder überlegene Ergebnisse im Vergleich zu Modellen für einzelne Kontinente erzielt. Dies führte zur Erstellung einer globalen Suszeptibilitätskartierung für Murgänge, die signifikante Relevanz für eingehende wissenschaftliche Untersuchungen, internationale Planungsprozesse sowie die zukünftige Entwicklung von Modellen zur Vorhersage der Anfälligkeit und der Abschätzung der sozioökonomischen Folgen besitzt (KURILLA & FUBELLI 2022).

- **Das LANDSLIP-Projekt**

Das Science for Humanitarian Emergencies and Resilience (SHEAR)-Programm konzentriert sich auf die verbesserte Überwachung und Vorhersage von Naturgefahren und damit verbundenen Risiken in Regionen Subsahara-Afrikas und Südasiens. Ein spezifisches Projekt innerhalb des SHEAR-Programms, das LANDSLIP-Projekt, behandelt im Rahmen einer Studie unterschiedliche Ansätze, um das Risiko und die Dynamik von Muren effektiv zu bewerten (BUDIMIR et al. 2022). In Zusammenarbeit mit lokalen Organisationen und der Geological Survey of India (GSI) wurden zwei Modelle für die regionale Vorhersage von durch Regen verursachten Muren in zwei indischen Pilotregionen entwickelt (ebd.). Der Nilgiris-Distrikt im indischen Bundesstaat Tamil Nadu wird sowohl vom südwestlichen als auch vom nordöstlichen Monsun beeinflusst und ist durch eine erhöhte Murenaktivität gekennzeichnet. An dem Beispiel aus der Studie ist ersichtlich, welche Informationen bei der Erfassung von Muren u.a. relevant sind: Art der Umgebung wie z.B. Wald, die Nähe zu Straßen, zusätzlich der Straßentyp und die Lage in Bezug auf die Straße (oberhalb, unterhalb oder auf der Straße). Weitere wichtige Angaben umfassen die Korngröße (klein, mittel, groß), den Auslöser (Regenfall, Erdbeben oder andere) sowie das Material (Fels, Erde, Schutt) (ebd.).

- **LEWS**

Im Rahmen der sechsten Sitzung des World Landslide Forums im Jahr 2023 in Florenz wurden einige Schwerpunkte gesetzt, um aktuelle Defizite im erfolgreichen Betrieb von

LEWS zu überwinden. LEWS werden auf globaler, nationaler und regionaler Ebene nicht nur zur Vorhersage von Erdbeben eingesetzt, sondern auch für Mureignisse (GUZZETTI et al. 2020). Campbell (1975) kann als Pionier in der Konzeptionierung der Vorhersagbarkeit von regeninduzierten Muren angesehen werden, indem er als erster einen systematischen Rahmen für die Entwicklung eines Frühwarnsystems vorstellte (ebd.). Sein Fokus lag dabei auf der Antizipation von flachen Erdbeben und Muren speziell im südkalifornischen Raum. Er hebt die Schwierigkeit hervor, Murgänge an bestimmten Orten vorherzusagen, aufgrund der Vielzahl von Variablen, die den Ursprung jedes Ereignisses beeinflussen: „*The many variables that influence the origin of each individual debris flow make the prediction of small soil slips in specific places extremely difficult.*” (GUZZETTI et al. 2020: 2). Campbell schlägt ein dreiteiliges System vor, das aus Regenmessgeräten, einem Wetterkartierungssystem und einem administrativen sowie Kommunikationsnetzwerk besteht (ebd.). Diese Elemente bilden die Grundlage für ein integriertes Frühwarnsystem, das in der Lage ist, Daten zu sammeln, zu analysieren und kritische Warnungen effektiv zu kommunizieren. Aspekte, die eng mit den Sozialwissenschaften verbunden sind, einschließlich Kommunikationsstrategien und der sozialen Wahrnehmung von Warnungen und Unsicherheiten, gewinnen immer mehr an Bedeutung (WORLD LANDSLIDE FORUM 2023). Aktuelle Diskurse beziehen sich auf das Zukunftspotenzial von Fernerkundungs-Großdaten und den Einsatz künstlicher Intelligenz. Die Diskussion zwischen Entwicklern von Innovationen und jenen, die für die bestmögliche Nutzung verantwortlich sind, findet im internationalen Netzwerk namens „LandAware“, mit Experten für LEWS aus 48 Ländern weltweit, statt (ebd.).

▪ **Ansätze zur Standardisierung von Frühwarnmodellen**

Die Entwicklung und Implementierung standardisierter Frühwarnmodelle, insbesondere für Muren, ist komplex. Diese Komplexität ergibt sich aus der Vielfalt der verwendeten Programmiersprachen wie Python, Matlab und Java, verschiedenen Implementierungsmethoden und der Abhängigkeit von unterschiedlichen Systemumgebungen (LIU et al. 2023). Frühere Studien zeigen, dass LEWS oftmals mehrere Modelle und Rechenstufen integrieren, wobei ein einzelnes Modell meist nicht ausreicht, um zuverlässige Vorhersagen zu treffen. Stattdessen werden in der Regel mehrere relevante Modelle kombiniert, um die Vorhersagegenauigkeit zu erhöhen. Ein gemeinsamer Mechanismus für die Kombination und Verbindung verschiedener Modelle, der auch das Modifizieren

oder Ersetzen einzelner Modelle und das Anpassen der Verbindungen ermöglicht, ist laut der Fallstudie von Liang Liu (Central South University, China) bislang kaum erforscht (ebd.). Mittels Testungen in den Überwachungspunkten NiutangAo und Jiangdong wurde in der Studie versucht ein Rahmenwerk zur dynamischen Verwaltung und standardisierten Einbindung von Modellen in Frühwarnsysteme für Massenbewegungen zu präsentieren. Der Rahmen bestimmt, ob eine Warnung basierend auf verschiedenen Ebenen in den Ergebnissen ausgelöst wird (ebd.).

Unabhängig von der Klassifizierung eines Frühwarnsystems sind diesem bestimmte Kriterien vorzuschreiben, die zu erfüllen sind (STÄHLI et al. 2015). So sind die Systeme mit klaren, nachvollziehbaren Schwellenwerten auch für Laien verständlich zu implementieren. Sie sollten weiters auf einer Vielzahl von mehreren redundanten Sensoren basieren, um Ausfälle zu vermeiden. Außerdem müssen die Messinstrumente präzise und die gesamte Anlage robust genug sein, um verschiedenen Umweltbedingungen und mechanischen Störungen standhalten zu können (ebd.; siehe auch MICHOU et al. 2013). Zudem ist es wichtig, dass die Frühwarn- und Monitoringsysteme eine gewisse Autonomie in Bezug auf Stromversorgung und Datenübertragung aufweisen, um auch in abgelegenen Gebieten zuverlässig zu funktionieren (MITTELSTÄDT & SFC ENERGY 2022). Trotz der fortgeschrittenen Entwicklung von automatischen Erkennungssystemen von Murenprozessen, wird die breite Einführung dieser Systeme durch das „*Verantwortungsproblem*“ erheblich behindert (COVIELLO 2023). Dies umfasst Unklarheiten bezüglich der Alarmverantwortung, Akzeptanz von Fehlalarmen, erforderliche Vorlaufzeiten, angemessene Maßnahmen für verschiedene Alarmstufen sowie die Gefahr, dass Entscheidungsträger*innen strukturelle Schutzbaumaßnahmen bevorzugen und dies potenziell zu unerwünschten Bauvorhaben in Hochrisikogebieten führt (ebd.).

4.2 Grenzüberschreitende Kooperation

In der Alpenregion persistieren signifikante Schäden, die durch geomorphologische Prozesse wie Felsstürze, Murgänge, Flutereignisse und Schneelawinen verursacht werden. Bei derartigen Prozessen befindet man sich im Kontext Monitoring und Frühwarnung noch in einem frühen Stadium der innovativen Forschungs- und Entwicklungsarbeit (GLADE et al. 2019). In diesem Bereich ist eine verstärkte Kooperation auf inter-, intra- und transdisziplinärer Ebene, z.B. über die akademische Forschung hinaus mit Regierungsbehörden, notwendig. Für eine verbesserte Risikobewertung ist ein fundiertes Verständnis für Bewegungscharakteristika, Deformationsmuster, zeitliche Aktivität, Trigger-, Beschleunigungs- und Stabilisierungsfaktoren sowie

hydro-mechanische Eigenschaften des betroffenen Gebirges grundlegend (ebd.). Die zwischenstaatliche Zusammenarbeit erleichtert den Datenaustausch und trägt durch gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsinitiativen sowie Ausbildungsprogramme zur Erhöhung der Effektivität von Frühwarn- und Messsystemen und in weiterer Folge zur Verbesserung der Sicherheit und des Wohlergehens in gefährdeten Bevölkerungsgruppen bei. Die internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT mit Sitz in Klagenfurt widmet sich dem vorbeugenden Katastrophenschutz und fördert querschnittsorientierte Forschungsansätze zum Schutz des Lebensraums vor verschiedenen Naturgefahren, wie Hochwasser, Lawinen und Muren, sowie anthropogenen Beeinflussungen (INTERPRAEVENT 2024). Zu den Gesellschaftsmitgliedern zählen heute nebst österreichischen Gemeinden, Körperschaften und Privatpersonen auch Behörden von Nachbarländern wie das Schweizerische Bundesamt für Umweltschutz. Zu den Kernaufgaben dieser Forschungsgesellschaft zählen u.a. das Erfassen und Analysieren der Ursachen von Naturkatastrophen, das Publizieren wissenschaftlicher Ergebnisse und die kontinuierliche Weitergabe neuester Forschungserkenntnisse an Entscheidungsträger in Politik, Verwaltung, Wissenschaft und Wirtschaft (ebd.). Die Gesellschaft legt zudem einen starken Fokus auf internationale Aktivitäten und die Förderung des regelmäßigen Informations- und Wissensaustauschs, um als Bindeglied zwischen Wissenschaft und Praxis zu fungieren. In den letzten Jahren wurde verstärkt der Einsatz neuer Technologien für den Wildbachschutz forciert, darunter verschiedene Mess- und Warnsysteme. Eine der wichtigsten Aufgaben in diesem Kontext ist die regelmäßige Kontrolle der Wildbacheinzugsgebiete, um durch das konsequente Freihalten der Bachläufe von Ablagerungen und das rechtzeitige Erkennen neuer Gefahrenherde zukünftigen Schäden in Siedlungsräumen effektiv vorzubeugen (ebd.).

Die aktuelle Forschungslandschaft bemüht sich um eine fortschrittliche Entwicklung und Implementierung innovativer Frühwarnprojekte. Dies zeigen auch die Ergebnisse grenzüberschreitender Zusammenarbeit von drei italienischen Institutionen – der Regionalen Agentur für Umweltschutz Venetien (ARPAV), der Universität Padua und der Universität Udine – gemeinsam mit zwei österreichischen Forschungseinrichtungen – dem Bundesforschungszentrum für Wald (BFW) und GeoSphere Austria – aus dem Kooperationsprojekt INADEF (HAGEN & LECHNER 2020). Das Projekt verfolgt das Ziel, ein Frühwarnsystem für Murenereignisse zu entwickeln, das Vorwarnungen innerhalb eines Zeitfensters von mehreren Stunden ermöglicht. Dieses System soll als eine ökonomisch effiziente und ökologisch weniger invasive Alternative zu permanenten Sicherungsbauten fungieren. Die konzeptionelle Basis von INADEF besteht in

der Synthese etablierter Methodiken, integriert in eine WEB-GIS Plattform der Universität Udine (ebd.). Die aus einem Programm resultierenden Abflusshydrographen werden in ein numerisches Modell der Universität Padua eingespeist, welches das Potenzial eines Murgangs inklusive dessen Volumen und Dynamik berechnet (HAGEN et al. 2022). Bei Überschreiten definierter Schwellenwerte erfolgt eine automatisierte Benachrichtigung der zuständigen Behörden. Das System wurde in diversen Testregionen wie Bettelwurfgraben in Halltal (Tirol) und Moscardo-Bach (Friaul-Julisch Venetien) erprobt (ebd.). Dabei zeigte sich, dass die Genauigkeit der Vorhersagen je nach Szenario und Testgebiet variierte, in einigen Gebieten gute Ergebnisse erzielte, in anderen jedoch weniger zufriedenstellend war. Es ist zu konstatieren, dass, vor allem aufgrund von Aspekten der Modellkalibrierung, sowohl das Auftreten von Fehlalarmen als auch die Nichterfassung relevanter Ereignisse nicht gänzlich ausgeschlossen werden konnten. Zukünftige Entwicklungen in der SAR-Satellitentechnologie, Rechenleistung und Algorithmen Genauigkeit versprechen weitere Verbesserungen, insbesondere für die Überwachung schneller Massenbewegungen (GEOSPHERE AUSTRIA o.J.).

Für eine optimale Prognosequalität spielen die Akzeptanz und das Engagement der (lokalen) Verantwortlichen und der Bevölkerung eine entscheidende Rolle (SCHMIDT 2003). Die Bundesanstalt für Geologie, Geophysik, Klimatologie und Meteorologie in Österreich beteiligt sich auch an Projekten zur Förderung der internationalen Zusammenarbeit derartiger Systeme, wie beispielsweise an der europäischen Initiative ARISTOTLE (All Risk Integrated System Towards Trans-boundary hoListic Early-warning) im Rahmen des Europäischen Mechanismus für Katastrophenschutz (UCPM - Union Civil Protection Mechanism) (ARISTOTLE o.J.). Im Zentrum einer Studie der Universität Potsdam stand die Implementierung benutzerorientierter Visualisierungstechniken und Online-Kartendienste, um die Kommunikationsbrücke zwischen Wissenschaftler*innen und nicht-akademischen Interessensgruppen zu stärken (BERGNER et al. 2018). Diese Ansätze wurden in Kooperation mit den für die Gefahrenminderung zuständigen staatlichen Behörden entwickelt und zielten darauf ab, über die Grenzen traditioneller GIS-Kartierungsdienste hinauszugehen und individuelle Benutzererwartungen zu integrieren, um so den Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse sowie die Anwendungsbereiche der Expertise zu erweitern. Konkret wurden drei innovative Beispiele untersucht (ebd.): Erstens die Implementierung von 3D-Visualisierungen geografischer Daten in einem Hochwasserkontext in Südsachsen, wo durch eine kooperative Entwicklung einer 3D-immersiven Präsentations- und Studien-Umgebung die Diskussionen mit lokalen Behörden über die realen Auswirkungen von z.B. Bodensättigung unterstützt wurden. Zweitens der Einsatz eines Tisch-Mapping-Geräts in einem

Massenbewegungs-gefährdeten Gebiet in Kolumbien, das eine direktere Interaktion zwischen Wissenschaftler*innen und Laienpublikum durch gestische und haptische Manipulation der präsentierten Daten ermöglichte. Drittens die Entwicklung neuer onlinebasierter Kartendienste zur Integration von z.B. Wetterdaten in eine benutzerzentrierte Plattform, etabliert in Zusammenarbeit mit dem argentinischen Netzwerk für umfassendes Risikomanagement und dem Institut für wissenschaftliche und technische Forschung für die Verteidigung (ebd.). Die Ergebnisse der Studie unterstreichen den hohen Wert in Richtung Verbesserung der Kommunikation und der Zugänglichkeit von wissenschaftlichen Erkenntnissen über Naturgefahren für eine breitere, nicht-akademische Zielgruppe (ebd.).

4.3 Aktueller Forschungs- und Entwicklungsstand in Österreich

Ein wichtiges Feld der Geowissenschaften und Katastrophenvorsorge in Österreich ist die Forschung und Entwicklung im Bereich Frühwarnung von Muren. In gebirgigen Zonen, die von schadensbringenden Muren bedroht sind, spielt die wissenschaftliche Untersuchung der Frequenz solcher alpiner Naturereignisse, Einflüsse und Veränderungen sowie der Stand der Technik von Frühwarnmaßnahmen eine wesentliche Rolle. Das Spektrum an Informationen reicht von der Entwicklungsarbeit innovativer Frühwarnkonzepte, wie dem INADEF-Projekt, bis hin zu umfassenden Analysen und Studien, die von Institutionen wie GeoSphere Austria und BOKU durchgeführt werden.

Im Rahmen der österreichischen Rechtsordnung ist die Zuständigkeit für den Schutz vor Wildbächen verfassungsrechtlich dem Bund zugewiesen (§ 10, B-VG 2020). Diese Aufgabe von der Bundesregierung wird durch eine dem Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) direkt unterstellte dezentrale Einrichtung, den Österreichischen Dienst für WLW, wahrgenommen (DRAGOVIĆ et al. 2022). Im Aufgabenbereich der WLW liegt ein zentraler Fokus auf den nachhaltigen Schutz, welcher sowohl wirtschaftliche, soziale als auch ökologische Aspekte berücksichtigt (MÖDLHAMMER 2014). Die WLW unterhält in Österreich 21 Gebietsbauleitungen, die eine flächendeckende, präventive Absicherung gegen alpine Naturgefahren gewährleisten und als zentrale Ansprechpartner für Gemeinden, Bezirksbehörden sowie betroffene Bürger*innen fungieren. Die Zusammenarbeit erfolgt mit einzelnen Personen und Privatunternehmen wie dem Ingenieurbüro für Technische Physik IBTP-Koschuch e.U., Sommer Messtechnik GmbH und Andreas Schimmel Alpine Monitoring Systems, welche diverse Sensoren und Systeme verkaufen (KOSCHUCH 2024).

Die Relevanz umfassender Datenbestände für die Tätigkeitsfelder der WLW sowie für Forschungszwecke ist von hoher Bedeutung. Dies führte 2019 zur Initiierung eines Kooperationsprojekts zwischen der WLW und der Geosphere Austria, die mit der meteorologischen Kurzfristprognose eine der wichtigsten Grundlagen für die Frühwarnung bildet (LEBEN MIT NATURGEFAHREN o.J.; siehe auch RUDOLF-MIKLAU 2009). Das vorrangige Ziel des Projekts besteht darin, die spezifischen Fachkenntnisse beider beteiligter Institutionen zu aggregieren, mit dem langfristigen Vorhaben, eine zentrale Datenmanagementstruktur zu etablieren und die Distribution von Daten mittels Web-Services zu implementieren. So wurde beispielsweise eine Webapplikation „*Massenbewegungen*“ entwickelt, die zur Visualisierung und Analyse erhobener Monitoringdaten eingesetzt werden kann (GEOSPHERE AUSTRIA 2023). Der Einsatz von Monitoringsystemen unterstützt die WLW nicht nur in der Entwicklung von Gefahrenzonenplanung, sondern diese tragen auch zur Kalibrierung von Simulationsmodellen bei (ebd.; siehe auch SAUERMOSER 2019). Das Langzeit-Monitoring Projekt NoeSLIDE ist eine weitere nennenswerte Initiative zur Erforschung gravitativer Massenbewegungen: Dieses Projekt – eine Zusammenarbeit mehrerer Institutionen/Dienststellen, darunter der Universität Wien und des Geologischen Dienstes des Landes Niederösterreich – konzentriert sich auf die langfristige Überwachung und Analyse unterschiedlicher Typen von Massenbewegungen in ausgewählten Gebieten Niederösterreichs (NOESLIDE 2024). Z.B. wurden 2014 am von Muren betroffenen Standort Hofermühle (Waidhofen/Ybbs) diverse Untergrund- und Oberflächenmonitoringsysteme installiert. Hierbei wird neben traditionellen Methoden auch auf innovative Ansätze wie permanente Geoelektrik gesetzt. Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung einer web-basierten Plattform. Diese benutzerorientierte Darstellung soll im Katastrophenfall schnelle und informierte Reaktionen der zuständigen Behörden unterstützen (ebd.).

Die Generierung akkurater Gefahrenkarten sowie Zonenpläne für gravitative Naturphänomene ist ein Unterfangen, das in Österreich bislang nur in begrenztem Umfang realisiert wurde. Die mangelhafte Kartierung dieser Gefahren birgt substantielle ökonomische Risiken, welche insbesondere relevant für Sektoren wie die Raumplanung, die Entwicklung und Erhaltung von Infrastrukturen, den Tourismussektor sowie für die Versicherungsbranche sind (ÖROK 2016). Grundsätzlich wird zwischen geologischen, geomorphologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Kartierungsarten unterschieden (ZANGERL et al. 2008). In einer Publikation aus dem Jahr 2008 ist die Rede vom „*Prototyp-Stadium*“ in Bezug auf Entwicklung der Frühwarnsysteme (HATTENBERGER & WÖLLIK 2008: 90). Hervorgehoben wird, dass bauliche

Schutzmaßnahmen gegen Naturkatastrophen lange Zeit als Vorreiter galten, bis Frühwarnanlagen sich im Vergleich dazu als kosteneffizienter und schneller umsetzbar zeigten (ebd.). Wie gestaltet sich die Finanzierung solcher Anlagen und wie sind die rechtlichen Rahmenbedingungen? In Österreich tragen Gebietskörperschaften (Bund, Länder, Gemeinden) die Kosten für Aufgaben, die in ihren Zuständigkeitsbereich fallen. So übernimmt der Bund die Kosten für Systeme, die von der WLVB betrieben werden, während Länder und Gemeinden die Kosten für Systeme tragen, die sie zur Erfüllung ihrer gesetzlich übertragenen Aufgaben einsetzen (ebd.). Ein Katastrophenfonds ist vorgesehen „zur Finanzierung des Warn- und Alarmsystems in der Höhe von maximal 3 634 000 Euro jährlich. Voraussetzung hierfür ist das Bestehen einer diesbezüglichen Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG zwischen dem Bund und den Ländern.“ (§ 3 Abs. 4 S. 4c KatFG 1996).

Gegenwärtig existiert keine explizite gesetzliche Verpflichtung für den Betrieb von Warn- und Messsystemen von Muren (SCHMIDT et al. 2014). Die Entscheidung über die Eignung und Errichtung solcher Systeme als Präventions- und Schutzmaßnahme obliegt den Einrichtungen, die für die Gefahrenprävention und -bekämpfung verantwortlich sind. Zudem werden Mess- und Warnsysteme rechtlich nach den Bestimmungen des jeweiligen Hauptanwendungsbereichs behandelt, ohne eine spezifische rechtliche Grundlage für ihre Errichtung und ihren Betrieb. Die Verantwortung für die Instandhaltung dieser Systeme liegt bei der Errichter- und Betreiberseite der Anlage (ebd.). Auch ist anzumerken, dass ein Frühwarnsystem höhere Anforderungen stellt als beispielsweise „nur“ ein Datenerfassungssystem (SCHELLANDER 2023). Der Grund dafür ist, dass man – wie der Name schon sagt – bei einer erhöhten Risikostufe Warnmeldungen an verschiedenen Zielpersonen sendet und diese dementsprechend adaptiert werden sollten. Ob Frühwarnsysteme tatsächlich „kosteneffizienter“ sind als andere Modelle – oder sich als solche im Laufe der Jahre erwiesen haben, kann hier nicht beurteilt werden. Bei einem Puls-Kompressionsradar liegt der Kaufwert jedenfalls bei etwa 100.000 Euro (KOSCHUCH 2024).

5. Bestandteile und Funktionsmechanismen von Frühwarn- und Monitoringsystemen

Dieses Kapitel behandelt Aspekte der technischen Prämissen, Funktionsprozesse und Hauptkomponenten von Frühwarn- und Monitoringsystemen.

Für eine effektive Implementierung eines geeigneten Rahmens ist die Identifizierung von Merkmalen und Grenzen der Systeme wesentlich (KHANKEH et al. 2019). Entscheidend ist nicht nur eine solide wissenschaftliche und technische Grundlage zu haben, sondern auch betroffene Menschen in den Mittelpunkt zu stellen (BASHER 2006). In der Theorie unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren. Aktive Maßnahmen beinhalten direkte Eingriffe in den Naturgefahrenprozess, um diesen positiv zu beeinflussen. Passive Maßnahmen zielen hingegen darauf ab, die Auswirkungen des Prozesses zu mildern und das Risiko zu reduzieren, ohne den Prozess direkt zu beeinflussen (HÜBL et al. 2014). Diese Schutzmaßnahmen können weiter in permanente und temporäre Lösungen unterteilt werden. Temporär-aktive Maßnahmen umfassen z.B. gezielte Entwässerung, während temporär-passive Maßnahmen die präventive Sperrung von Verkehrswegen, Geschwindigkeitsreduzierungen oder die Evakuierung von Siedlungen einschließen (ebd.). Monitoringsysteme sind eine Grundlage für Forschung, für langfristige Planung und Überlegungen zu präventiven Maßnahmen, während Frühwarnsysteme auf die Warnung vor bevorstehenden Naturgefahren ausgerichtet sind, um schnelle Reaktionen und Schutzmaßnahmen zu ermöglichen. Frühwarnsysteme basieren auf Monitoring-Strukturen und sind durch ein hohes Maß an Automatisierung im Warnprozess charakterisiert (SAUSGRUBER 2018). Monitoring kann folgendermaßen definiert werden: „*Monitoring umfasst alle Methoden der unmittelbaren systematischen Erfassung, Beobachtung oder Überwachung eines Ereignisses oder Prozesses mittels technischer Hilfsmittel oder anderer Beobachtungssysteme.*“ (RUDOLF-MIKLAU 2009: 126)

Klassifizierungen können bei der Organisation der Systeme behilflich sein und sind keine Seltenheit in Werken, die sich mit dem Gegenstand auseinandersetzen (siehe SÄTTELE & BRÜNDL 2015; MAYER et al. 2010a; RUDOLF-MIKLAU 2009). So werden Warnsysteme von Muren in zwei fundamentale Kategorien eingeteilt: Vor-/Frühwarnsysteme und Ereigniswarnsysteme (ARATTANO & MARCHI 2008). Präventive Warnsysteme prognostizieren die potenzielle Manifestation eines Murereignisses, indem sie kontinuierlich prädisponierende

Faktoren evaluieren, bevor sich ein solches Ereignis materialisiert. Im Gegensatz dazu identifizieren Ereigniswarnsysteme, einen Murgang in ihrer aktiven Phase und initiieren daraufhin einen Alarmprozess, der schlussendlich in der Ausgabe einer öffentlichen Warnung mündet (ebd.). Ergänzend führten Hungr et al. eine weitere Kategorie ein: die Nachereignis-Warnsysteme (HUNGR et al. 1987). Diese sind speziell dafür konzipiert, die Tatsache zu erkennen, dass ein Murgang stattgefunden hat und ermöglichen somit die Einleitung adäquater Reaktionsmaßnahmen, wie beispielsweise die Unterbrechung des Verkehrsflusses auf Verkehrswegen, um potenzielle weitere Schäden zu verhindern. Die vorherrschenden präventiven Warnsysteme für Muren basieren auf empirisch ermittelten Zusammenhängen zwischen Niederschlagsereignissen und der Manifestation der Naturgefahr (ARATTANO & MARCHI 2008). Ein umfassendes Warnsystem vermag Subsysteme zu integrieren, die sowohl präventive als auch akute Warnfunktionen bereitstellen (ebd.).

Mayer et al. unterscheiden ein Monitoringsystem, welches primär dem Verständnis physischer Prozesse dient, von einem Expertensystem, das hilft, Informationen zu interpretieren und so eine fundiertere Einschätzung potenziell kritischer Situationen zu ermöglichen. Im Gegensatz dazu steht das Alarmsystem, welches eine noch spezifischere Funktion erfüllt. Es ist darauf ausgerichtet, automatisch Alarm zu schlagen, sobald bestimmte, vordefinierte kritische Schwellenwerte überschritten werden (MAYER et al. 2010a). Dieses System ist also weniger auf das tiefgreifende Verständnis oder die Analyse der Daten ausgerichtet, sondern fokussiert sich auf den unmittelbaren Alarm bei Erreichen kritischer Zustände (ebd.). Insofern existiert eine Differenzierung zwischen Alarm- und Warnsystemen in ihrer eigentlichen Grundfunktion: *„Die Alarmierung hat eine reine >Weckfunktion<, erreicht eine Aufmerksamkeit und Sensibilisierung bei den Empfängern und fordert sie auf, sich zu informieren. Die eigentlichen Warnung liefert schon mehr, wenn auch noch nicht unbedingt ausreichend Informationen im Sinne von konkreten Handlungsanweisungen.“* (HEISTERKAMP et al. 2016: 539; siehe auch GEENEN 2009). Kombisysteme kombinieren beide Ansätze, um sowohl auf spontane als auch auf langfristige Risiken zu reagieren (SÄTTELE & BRÜNDL 2015). In der Praxis werden beispielsweise im Nachbarland Schweiz alle drei Typen eingesetzt (GEOPRAEVENT 2022). In Österreich haben Bund und Länder ein gemeinsames staatliches Warn- und Alarmsystem mit Warnzentralen auf Bundes-, Landes- und teilweise auf Bezirksebene als Schutzfunktion bei Hochwasser-, Lawinen- und Unwetterwarnung, welches aber hier nicht näher behandelt wird (RUDOLF-MIKLAU 2009). So ist es z.B. im Fall von bedrohlichen Murgängen eher unwahrscheinlich, dass diese in den Aufgabenbereich einer Bundeswarnzentrale fallen, da die Dimensionen

auf lokale Warnsysteme und regionale Gebietsbauleitungen zutreffen (OSTERMANN & AMABILE 2019).

Hans Secher Schmidt sieht folgende sechs unabdingbare Schlüsselkomponenten eines Frühwarnsystems, wobei letzteres als ein „*versteckter*“ Hauptfaktor definiert wird: „*These are: Detection; Prediction; Planning and Decision Making (Command and Control); Response (Countermeasures and Warning); Reaction (Population Reaction and Hazard Behaviour); and the hidden element would be communications regarding all the above.*“ (SCHMIDT 2003: 818). Basierend darauf, unterteilt diese Arbeit den systembezogenen Ablauf in vier Bereiche – Erfassung, Verarbeitung und Interpretation, Warnung und Intervention sowie Kommunikation:

- **Datenerfassung**

Sensoren sind zentral für die Erfassung von Umweltveränderungen und die Umwandlung physikalischer Parameter in digitale oder analoge Signale. Die Selektion geeigneter Sensoren, z.B. eines Pegelradars, hängt vom spezifischen Prozess, den lokalen Gegebenheiten und den Anforderungen ab. Die Vielfalt der verfügbaren Sensoren reicht von Bewegungssensoren und Kraftmessgeräten bis hin zu Sensoren für Fernmessungen wie interferometrisches Radar (SÄTTELE & BRÜNDL 2015).

- **Datenverarbeitung und -interpretation**

Lokale Datenerfassungssysteme, wie Datenlogger oder Rechner, übernehmen die Kontrolle und Steuerung der Sensoren, führen eine Vor-Ort-Datenspeicherung und -analyse durch und initiieren bei Überschreitung vordefinierter Schwellenwerte, Alarmierungen oder Warnungen. Für komplexere Datenverarbeitungsaufgaben wird die Analyse und Entscheidungsfindung auf dedizierten Servern durchgeführt. Die Übertragung der erfassten Daten über längere Distanzen erfolgt mittels verschiedener Kommunikationstechnologien wie Mobilfunk, Telefon, Internet oder Satellitenkommunikation, wobei die Verwendung von Kabelverbindungen seltener ist. Zentralisierte oder redundante Serverstrukturen dienen der Speicherung und weiteren Verarbeitung der Sensordaten, unterstützt durch Backupserver zur Datensicherung. Die Systemauswahl richtet sich nach Kriterien wie Rechen- und Speicherkapazität, Messfrequenz, Energieverbrauch, Alarmlogik und spezifischen Umwelтанforderungen (SCHMIDT 2003).

▪ **Warnung und Intervention**

Automatisierte Interventionen umfassen den Einsatz von optischen und akustischen Signalen, Barrieren und Unterbrechungen der Fahrleitung im Schienenverkehr, um die Präsenz von Personen und mobilen Objekten in Gefahrenbereichen sofort zu reduzieren. Sicherheitsbeauftragte werden über SMS, Telefonanrufe oder E-Mails alarmiert. Organisierte Interventionen beinhalten den Einsatz von Rettungskräften für Absperrungen und Evakuierungen sowie die Nutzung von Sirenen, Radio, SMS, Internet und andere Medien zur Informierung betroffener Personen. Zudem können automatische Straßen- und Bahnsperren sowie Baustellenevakuierungen eingesetzt werden, unterstützt durch Verkehrsampeln, Funkgeräte und priorisierte Kommunikationsdienste (BASHER 2006). Ein Beispiel aus der Praxis ist die Warnmeldung an die Straßenmeisterei Zams betreffend den Gebirgspass Hahntennjoch L266 in Tirol. Wenn die Ampel auf Rot schaltet, erhalten die zuständigen Personen (Straßenmeister, Stellvertreter und Bereitschaft) eine SMS, die über die Aktivierung des roten Signals informiert wie im Anhang A1 ersichtlich (NEURAUTER 2023). Ab diesem Zeitpunkt ist eine Wartezeit von 40 Minuten vorgesehen, um abzuwarten, ob es weitere Meldungen gibt. Falls keine weiteren Meldungen eintreffen, wird eine Kontrollfahrt durchgeführt, währenddessen die Ampel weiterhin auf Rot steht. Stellt man während der Kontrollfahrt keine Vermurungen oder andere Vorkommnisse fest, wird die Polizei in Imst telefonisch kontaktiert, um die Ampel wieder auf Grün zu schalten (ebd.). Sollte es während der Kontrollfahrt zu einer Nachmeldung kommen, beginnt das Prozedere von neuem, allerdings mit einer verkürzten Wartezeit von 30 Minuten. Die Straßenmeisterei Zams muss jährlich etwa 30-mal aufgrund solcher Ereignisse ausrücken. Im Falle eines Ereignisses wird die Polizei informiert, dass die Straßensperre auf unbestimmte Zeit aufrechterbleibt (ebd.).

▪ **Kommunikation**

Die Datenübertragung innerhalb von Frühwarnsystemen involviert eine Kommunikationsinfrastruktur, die Sensoren, Datenlogger, Alarmierungseinheiten und zentrale Server umfasst. Diverse Kommunikationskanäle, darunter z.B. GSM (Mobilfunknetzwerke), WiFi und Glasfaserkabel werden entsprechend der spezifischen Anforderungen der Sensortypen eingesetzt. Um die Systemzuverlässigkeit zu erhöhen, wird der Einsatz von mindestens zwei unabhängigen Kommunikationskanälen empfohlen (GEOPRAEVENT 2022). Nach dem Auslösen der Warnung sind es die Charakteristika der

Kommunikationskanäle, welche den zeitlichen Verlauf der Informationsübermittlung determinieren (HÜBL & MATJAZŽ 2014).

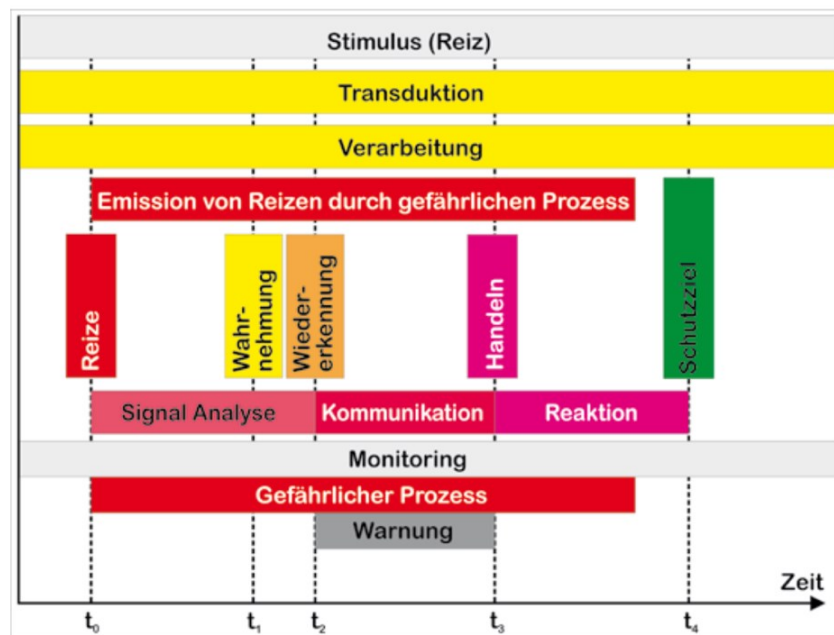


Abbildung 1 - Wahrnehmungskette, Monitoring und Warnung. (HÜBL & MATJAZŽ 2014: 52)

Wie funktioniert in der Praxis die Verbindung zwischen Monitoring und Warnung bei der Überwachung von Murenprozessen? Wie Abbildung 1 zeigt, wird ein mehrstufiger Ansatz zur Erfassung und Verarbeitung von Signalen verfolgt (HÜBL & MATJAZŽ 2014). Dieser Prozess beginnt mit der Detektion von Reizen durch Sensoren, gefolgt von der Umwandlung dieser Reize in elektrische Signale – ein Prozess bekannt als Transduktion oder Transformation. Die weitere Verarbeitung dieser Signale umfasst die Unterscheidung zwischen Signalen, die unterhalb einer bestimmten Wahrnehmungsschwelle liegen und daher ignoriert werden können, und solchen, die diese Schwelle überschreiten und für weiterführende Aktionen relevant sind. Dabei spielt der Abgleich aktueller Signale mit vorherigen Signalmustern für die Wiedererkennung eine wichtige Rolle. Bei ausreichender Signalstärke und Vorhandensein eines entsprechenden Regelwerks für das Signalmuster können vordefinierte Handlungsschritte initiiert werden. Entscheidend dabei ist die Minimierung der Zeitspanne zwischen der Wahrnehmung eines Signals und dessen Wiedererkennung (ebd.).

Auf welche Weise festgestellt werden kann, ob es Bedarf für die Installation eines Frühwarnsystems gibt und wie es operationalisieren soll, wird im Folgenden graphisch dargestellt (siehe Abbildung 2):

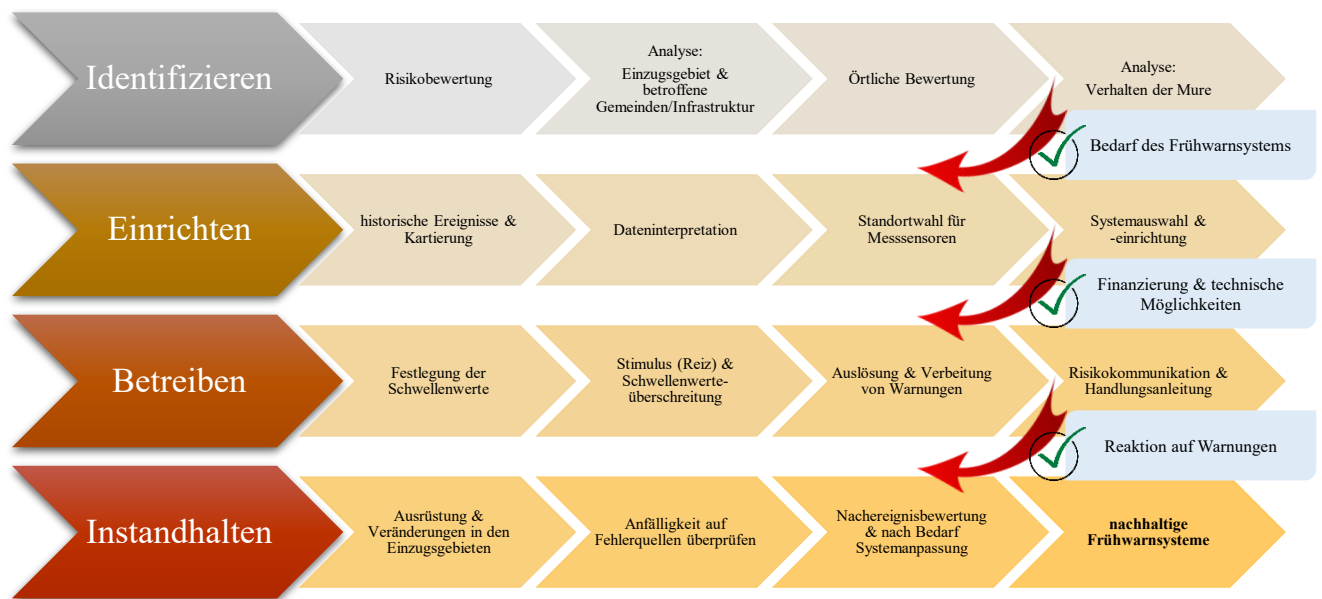


Abbildung 2 - Bedarfsanalyse für Frühwarnsysteme von Muren. (Eigene Darstellung; adaptiert nach TRIGG 2014)

Die Wartung und Instandhaltung spielen eine zentrale Rolle für die Nachhaltigkeit von Frühwarnsystemen, da sie die Langlebigkeit dieser Systeme entscheidend beeinflussen (ARATTANO & MARCHI 2008). Die Komponenten sind kontinuierlich physischen und technologischen Belastungen ausgesetzt, die ihre Funktionsfähigkeit auf Dauer beeinträchtigen. Eine nachhaltige Instandhaltungsstrategie würde nicht nur Ausfallzeiten minimieren, sondern auch zur Kosteneffizienz beitragen, indem teure Notfallreparaturen und der vorzeitige Komponentenersatz verhindert würden. Für eine akkurate Gewährleistung, dass Systeme nicht ausfallen, spielen Überlegungen zur Stromversorgung eine wichtige Rolle. Murgänge sind typische Prozesse für gebirgige Räume und insofern finden sich Monitoringanlagen an Stellen, wo für die Betreiberseite nicht immer die Möglichkeit besteht, vor Ort zu sein. Solarpaneele, Solargeneratoren, Brennstoffzellen, Batterien für mobile Monitoringdienste oder externe Netzteile sind einige der Varianten (OSTERMANN & AMABILE 2019). Welche Optionen besser geeignet sind als andere bleibt entsprechend der lokalen Umstände zu beurteilen.

5.1 Messensoren

Die sorgfältige Auswahl der Überwachungsparameter und der Schwellenwerte sind für funktionstüchtige Systeme grundlegend: „Die Qualität des automatisierten Alarm- oder Warnentscheids hängt direkt vom Schwellenwert ab. Bei Alarmsystemen ist der Schwellenwert das einzige Entscheidungskriterium, bei Warnsystemen ist der Schwellenwert die erste Instanz vor dem

Menschen. Aufgrund dieses Schwellenwertes wird entschieden, ob Ereignisse detektiert und falsche Alarmer verhindert werden.“ (Sättele & Bründl 2015: 21). Inwiefern Frühwarn- und Monitoringsysteme zuverlässig sind, hängt im Wesentlichen ab von der strategischen Positionierung der Sensoren (siehe Kapitel 6) im Überwachungsfeld, der Bestimmung der Messintervalle sowie der Genauigkeit und Auflösung der Messdaten (HÜBL et al. 2014). Die Erfahrung aus der Praxis zeigt, dass ein nicht-optimal gewählter Standort, Vorwarnzeiten limitieren kann, wie es z.B. bei den Untersuchungen in der Farstrinne (Gemeinde Umhausen) der Fall war (HÜBL et al. 2016). Bei Murgängen können im weiten Sinne Klimaparameter, Flächenparameter, Verlagerungsprozesse sowie zusammengesetzte Parameter, bestehend aus Oberflächenabfluss, Feststoffverfügbarkeit und Wildholzeinwirkung erfasst werden (ANDRECS et al. 2010). Eng gefasst fallen darunter Variable wie Fließhöhe, Fließkraft, Oberflächengeschwindigkeit, Erschütterung und Porenwasserdruck aber auch Landnutzung, Vegetation und Orografie (ebd.; siehe auch HÜRLIMANN et al. 2019). Es gibt unterschiedliche Vorgänge und Modelle am Markt, um Murgänge erfassen und vor ihnen warnen zu können. Die Wahl richtet sich nach den zu überwachenden Parametern (ebd.). Die gängigsten Sensoren sind:

5.1.1 Geophone und Seismometer

Geophone und Seismometer operieren mit seismische Sensoren, die zur Messung von Bodenerschütterungen eingesetzt werden (JÄGER 2004). Sie bestehen grundlegend aus einer seismischen Masse, in der Regel einem Magneten, der sich frei in einer elektrischen Spule bewegen kann. Durch Bewegungen des Magneten, ausgelöst durch Bodenschwingungen, wird in der Spule ein Strom induziert, der als elektrische Spannung gemessen und üblicherweise in Millivolt (mV) angegeben wird (ebd.). Diese Geräte sind in der Lage, Vibrationen in einem Frequenzbereich von 10 Hz bis 300 Hz zu erfassen, wobei sie besonders effektiv sind bei der Detektion von Bodenschwingungen, die von Murgängen im Bereich zwischen 30 Hz und 80 Hz erzeugt werden (ebd.). Die dabei auftretenden Geschwindigkeiten der Bodenwellen variieren je nach Wellentyp zwischen einigen hundert bis zu einigen tausend Metern pro Sekunde. Je nach Anzahl der Raumachsen, in denen Schwingungen aufgezeichnet werden können, unterscheidet man zwischen ein- und dreidimensionalen Geophonen, wobei letztere eine umfassendere Analyse der Bodenbewegungen ermöglichen (GEOPRAEVENT 2022). Jüngste Untersuchungen von Daten, die mittels Geophonen und Videoaufnahmen erfasst wurden, offenbaren die Möglichkeit, diverse natürliche Bodenvibrationsquellen automatisiert zu klassifizieren (COVIELLO 2023).

5.1.2 Radarmessgeräte und Hochfrequenz-Radar

Radar (Radio Detection and Ranging) ist eine Technologie, die elektromagnetische Wellen nutzt, um Objekte zu detektieren und deren Abstand zu messen (MATJAŽ et al. 2014). Diese Technologie sendet in Lichtgeschwindigkeit gebündelte Wellen aus, die an Objekten reflektieren und vom Radar empfangen werden, um verschiedene Daten zu erfassen. Dessen Eigenschaften ermöglichen es, Einsichten in verschiedene Umgebungen zu gewinnen, etwa durch die Messung der Bewegungsintensität innerhalb eines spezifischen Erfassungsbereichs. Ein Radar erfasst Bewegungen innerhalb eines Kegels mit einem Öffnungswinkel von elf Grad, wobei der gemessene Wert von der Funktionsfähigkeit des Materials als elektrischer Isolator in einem elektrischen Feld, der Entfernung zum Objekt und der Bewegung innerhalb des Kegels abhängt (JÄGER 2004). Zu den spezialisierten Radararten gehört das interferometrische Georadar, welches die Phase der reflektierten Wellen misst, um kleinste Oberflächenveränderungen zu erkennen. Das Pegelradar wiederum sendet kurze Impulse aus, deren Laufzeit die Berechnung des Abstands zur Oberfläche ermöglicht (GEOPRAEVENT 2022).

Die moderne Technologie des Hochfrequenz-Radars, auch bekannt als Pulskompressionsradar bzw. Puls-Doppler-Radar, funktioniert folgendermaßen (SCHÖFFL et al. 2020; siehe auch KOSCHUCH & HÜBL 2015): Zunächst sendet es ein elektromagnetisches Feld in einer bestimmten Form (ähnlich einer Keule) aus. Dieses Feld bewegt sich auf einer Frequenz, die man als X-Band bezeichnet, und zwischen 10,1 und 10,3 Milliarden Schwingungen pro Sekunde (GHz) liegt. Innerhalb dieser Keule gibt es sogenannte „Rangegates“, die jeweils einer zeitlichen Pulslänge entsprechen. Wenn sich etwas im Feld bewegt oder steht, dann wird dies mittels Pulslänge reflektiert, welches als Doppler-Effekt bekannt ist. Indem das Radar diese Veränderung in der Frequenz misst, kann es berechnen, wie schnell das Ziel sich relativ zu ihm bewegt, auch bekannt als Radialgeschwindigkeit (siehe Anhang A2). Zu unterscheiden sind Pulsradare, in denen sich mehrere kleine Pulse auf verschiedene einzelne Objekte verteilen und die Pulse im Empfängerbereich wieder zusammenaddiert werden, von frequenzmodulierten Konzeptionen, die sich auf einen Pulsstrahl konzentrieren und energieaufwändiger sind (KOSCHUCH 2024). Der Algorithmus des Hochfrequenz-Radars unterscheidet z.B. ein Auto als Objekt von mehreren muren-typischen „Objekten“ (ebd.). Überwacht werden die Prozesse u.a. mittels HD-Videokamera. Die Einstellung der Schwellenwerte hängt von der Präferenz der Klientel ab (ebd.). Dieser Radar-Typ befindet sich seit 2011 am Lattenbach und seit 2018 bei der Messstation am Gadriabach (Talschaft Vinschgau, Südtirol). Installiert war es auch am Dawinbach (Strengen, Tirol) als Teil eines Frühwarnsystems gemeinsam mit Reißleinen im Rahmen von Bauarbeiten

zum Schutz der Bauarbeiter*innen. Die Installation der Detektionssysteme, bestehend aus Puls-kompressionsradar und Reißleine, erfolgte rund 800 m flussaufwärts, was im Falle eines detektierten Ereignisses eine Reaktionszeit von einer bis eineinhalb Minuten ermöglicht, abhängig von der Fließgeschwindigkeit des Wassers. Diese Maßnahme erlaubt die Kontrolle des gefährdeten Straßenabschnitts durch die potenzielle Aktivierung einer Rotlichtschaltung an drei Ampelanlagen; zur Absicherung der Baustelle wurde zudem eine Sirene in das Warnsystem integriert, die betroffene Personen akustisch vor einer unmittelbaren Gefahr warnt, während gleichzeitig eine SMS-Alarmkette ausgelöst wird, die detaillierte Informationen über den Ereignistyp und das auslösende Detektionssystem bereitstellt (siehe Anhang A2) (SCHÖFFL et al. 2020). Hierbei ist freilich eine Einschulung der Bauarbeiter*innen für die qualitative Gewährleistung des Schutzes erforderlich (KOSCHUCH 2024).

5.1.3 Ultraschall

Ultraschalltechnologie nutzt mechanische Schallwellen mit Frequenzen oberhalb von 20 kHz, die über das menschliche Hörvermögen hinausgehen, um verschiedenste Mess- und Diagnoseverfahren durchzuführen (MATJAŽ et al. 2014). Diese Schallwellen werden durch schwingende Teilchen in Materie erzeugt, wobei ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Schallgeschwindigkeit des jeweiligen Mediums abhängt. Ein wesentliches Anwendungsgebiet von Ultraschall ist die Abstandsmessung, basierend auf dem Prinzip der Echo-Messung. Hierbei wird die Laufzeit eines Ultraschallimpulses zwischen dem Sensor und dem zu messenden Objekt ermittelt (ebd.). Kurze Ultraschallpulse im Bereich von 30 bis 70 kHz können von einem Ultraschallwandler ausgesendet und von der Oberfläche des Messobjekts reflektiert werden (JÄGER 2004). Die Entfernung zur Oberfläche lässt sich dann durch die Zeit, die zwischen Aussendung des Schallimpulses und Empfang des Echos vergeht, unter Verwendung der Transitzeitmethode berechnen. Diese Methode findet beispielsweise Anwendung bei der Messung des Wasserstands, wobei plötzliche Erhöhungen des Fließniveaus als Indikatoren für bevorstehende oder stattfindende Murereignisse dienen (ebd.).

5.1.4 Laserscanner

Laserscanning, insbesondere durch LiDAR (Light Detection and Ranging) -Technologie, stellt eine Methode zur Abstands- und Geschwindigkeitsmessung dar, die auf der Nutzung von Laserstrahlen basiert (GEOPRAEVENT 2022). Diese Technologie eignet sich besonders gut für die hochaufgelöste Vermessung großer Flächen durch dreidimensionales Abtasten der Oberfläche und findet Anwendung in der Deformationsanalyse sowie der Volumenabschätzung (ebd.;

siehe auch MATJAŽ et al. 2014). Nebst 3D-Verfahren, also Terrestrisches und Airborne Laserscanning (Luftaufnahme) wie am Gschliefgraben und am Einzugsgebiet des Moscardo in den Alpen Italiens durchgeführt (BLASONE et al. 2014), werden auch 2D-Laserscanner eingesetzt. Letztere sind allerdings noch nicht für Überwachungen in Echtzeit oder nahezu Echtzeit geeignet (HÜRLIMANN et al. 2019).

5.1.5 Drahtsensoren und Reißleinen

Hierbei handelt es sich um Auslösevorrichtungen in Systemen, bei denen eine oder mehrere Drahtsensoren bzw. Reißleinen zum Einsatz kommen können (SCHÖFFL & HÜBL 2020). Überschreitet ein Murgang die Höhe eines bestimmten Kontrolldrahtsensors, wird dieser Draht durch das Erreichen einer voreingestellten Zugkraft an einem Anker magnetisch demontiert. Ein Zug am Draht löst eine Signaländerung (0, 1) aus, wodurch das System aktiviert wird (ebd.; siehe auch MATJAŽ et al. 2014). Diese Methode kann sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Ausrichtung angewendet werden, wobei bei einer vertikalen Anordnung in einem Querschnitt mehrere Drahtsensoren (Zugseile) verteilt werden können, um auch weite Querschnitte leicht zu überwachen. An jedem Zugseil sind am unteren Ende Gegengewichte montiert, sodass sie beim Durchfließen eines Murgangs durch den Kontrollquerschnitt erfasst und abgezogen werden können (ebd.).

5.1.6 Sonstige

Messtechniken lassen sich in vier Hauptkategorien einteilen: a) erdgestützte geodätische Verfahren wie Entfernungsmessung, dreidimensionale Positionierungssysteme und Totalstationen, b) satellitengestützte geodätische Verfahren wie GPS, c) geotechnische Methoden, einschließlich Extensometer, Inklinometer und Piezometer sowie d) Fernerkundungstechniken, darunter hochauflösende Satellitenbilder und UAV-gestützte Vermessungen (unbemannte Luftfahrzeuge) wie am Gallenzerkogel (EKER et al. 2018). In einer mit Inklinometern ausgestatteten Bohrung erfolgt die Erfassung der vertikalen Neigung in zwei senkrecht zueinanderstehenden Achsen (ZANGERL et al. 2008). Die Analyse der Horizontalverschiebungen entlang des Bohrlochs ermöglicht die Gewinnung essentieller Daten bezüglich der Anzahl und Stärke aktiver Bewegungszonen sowie der internen Deformationen bewegter Massen. Die Inklinometersonde wird in vorgegebenen Intervallen von 0,5 oder einem Meter aus dem Bohrloch hochgezogen. Durch diese periodische Messungen lassen sich zudem Geschwindigkeiten von Hangmurenbewegungen in unterschiedlichen Tiefen bestimmen (ebd.). Die Anwendung eines Bohrlochinkli-

nometers repräsentiert ein gängiges Verfahren zur linienförmigen Erfassung geotechnischer Daten, im Vergleich zur punktuellen Messung (THUT 2003). Ein Extensometer, auch Dehnungssensor genannt, dient zur Messung von Dehnungen, die durch Zug-, Druck- oder Biegekräfte verursacht werden. Stangenextensometer zählen zu den vorrangig eingesetzten Instrumenten zur Erfassung axialer Deformationen entlang von Bohrlöchern (GEODATA o.J.). Nennenswert ist auch das Messverfahren mittels GPS: Punktueller Messungen werden durch den Einsatz mehrerer differenzieller GNSS-Geräte vorgenommen. Ein Gerät wird in einem relativ stabilen Bereich positioniert und fungiert als Referenzstation. Diese GNSS-Geräte analysieren Positions- und Zeitdaten, die von Satelliten übermittelt werden, und leiten diese Daten zur Berechnung der Verschiebungen an zentrale Server der Anlagebetreiber*innen weiter (GEOPRAEVENT 2022). Eingesetzt wird dies vorwiegend für Großhangbewegungen wie am Hornbergl oder am Vögelsberg in der Gemeinde Wattens (OSTERMANN & AMABILE 2019).

5.1.7 Stärken und Schwächen der Messsensoren

Differenzen zwischen den Sensoren liegen vor allem in ihren Einsatzbereichen und spezifischen Stärken sowie Schwächen. Während Geophone und seismische Sensoren besonders robust und unabhängig von der Tageszeit sind, ermöglicht Radar effektive Messungen unter schlechten Sichtverhältnissen wie Nebel oder Schneefall (GEOPRAEVENT 2022; siehe auch A-RATTANO & MARCHI 2008). Ultraschalltechnologie bietet präzise, nicht-invasive Messungen, ist jedoch stark temperaturabhängig (MATJAŽ et al. 2014). LiDAR sticht durch seine Fähigkeit zur großflächigen Vermessung mit hoher Präzision hervor, benötigt jedoch klare Sichtverbindungen (GEOPRAEVENT 2022). Reißleinen und Drahtsensoren zeichnen sich durch ihre Kosteneffizienz und Einfachheit aus, sind aber nach der Aktivierung nicht wiederverwendbar – eine Person muss dann vor Ort die Reißleine ersetzen. Probleme bei der Detektion können auftreten, falls das auslösende Ereignis die Reißleine nicht wie vorgesehen zerstört, beispielsweise wenn die Verankerung herausgerissen wird, die Reißleine selbst aber intakt bleibt, das Ereignis die Reißleine außerhalb der Sollbruchstelle beschädigt oder die Reißleine gänzlich verfehlt (MATJAŽ et al. 2014; siehe auch KOSCHUCH 2024). Linienweise Messverfahren, wie Inklinometermessungen, bieten Einblicke in die Tiefe der Gleitebene, sind aber durch hohe Kosten und den Bedarf an manuellen Messungen limitiert (THUT 2003). Im Kontext der berührungslosen Detektion von Abflusshöhen bieten sich drei zentrale Typen von Messinstrumenten an: Lasertechnologie, Radartechnologie sowie Ultraschalltechnologie (GRAF et al. 2007).

Aus den Untersuchungen im Illgraben bei Leuk im Kanton Wallis ging hervor: „*Probleme ergaben sich bei schnell ändernder Abflusshöhe für den Ultraschall und bei stark bewegter Oberflächenstruktur mit Ausbildung von Spritzern für den Laser.*“ (GRAF et al. 2007: 124).

Gemeinsame Stärken der Technologien Geophone, Reißleinen sowie GNSS-Geräte umfassen die Fähigkeit zur Echtzeitüberwachung und Alarmierung (GEOPRAEVENT 2022). Die Integration mit modernen Technologien ermöglicht zudem den Zugriff auf Daten und die Fernsteuerung von Schutzmaßnahmen über Online-Portale und mobilen Endgeräte. Darüber hinaus bieten Technologien wie Radar und LiDAR den Vorteil hoher Genauigkeit und Reichweite im Vergleich zu Ultraschallwellen, unabhängig von visuellen und anderen lokalen Bedingungen (ARATTANO & MARCHI 2008). Im Unterschied zu Radar, das elektromagnetische Wellen außerhalb des optischen Frequenzbereichs verwendet, nutzt LiDAR elektromagnetische Wellen im optischen Frequenzbereich, was kürzere Wellenlängen und somit eine höhere Präzision in der Abstandsmessung ermöglicht (GEOPRAEVENT 2022). Puls-Doppler-Radare finden aufgrund ihrer hohen Anforderungen an Rechenleistung und Speicherkapazität nur begrenzte Verbreitung (COVIELLO 2023). Schwächen beinhalten die Risiken von Fehlalarmen durch externe Quellen von Bodenvibrationen verursacht durch Fahrzeuge, sich im Feld aufhaltende Menschen sowie Tiere und die Abhängigkeit von Wetterbedingungen, die die Messgenauigkeit beeinträchtigen können. Andererseits kann das Erfordernis, das Signal zu filtern, die Systemkomplexität weiter erhöhen (ARATTANO & MARCHI 2008). Die Platzierung von Radarmessgeräten über einem Kanal kann schwierig sein, insbesondere wenn die Uferböschungen instabil sind (ebd.). Spezifische Herausforderungen wie die Notwendigkeit der Temperaturkompensation oder die Beeinträchtigung der Messfähigkeit durch topografische Hindernisse wie enge Täler, Felswände oder Bäume und Schneebedeckung limitieren ebenfalls die Anwendbarkeit einiger Sensoren (GEOPRAEVENT 2022). Insbesondere Ultraschalltechnologie zeigt eine hohe Sensitivität gegenüber Umgebungsbedingungen (JÄGER 2004). GNSS-Referenzgeräte sollten auf festem Untergrund positioniert werden, um zuverlässige Daten zu gewährleisten (THUT 2003).

Festzuhalten ist, dass sich Monitoringverfahren von Muren, in Abgrenzung zu tiefgründigen Rutschungen, primär nicht auf die initiale Phase des Prozessbeginns, sondern vielmehr auf die Detektion des Ereignisses während dessen Ablaufs, fokussieren (THIEBES & GLADE 2016). Hagen et al. identifizieren in der Domäne der Frühwarn- und Monitoringsysteme für Murgänge

zwei primäre Kategorien von Funktionsmechanismen (HAGEN et al. 2022): Der erste Mechanismus umfasst die Inbetriebnahme von Sensoren, wie Geophone und Pegelsensoren, im oberen Einzugsbereich eines Murgangs. Detektoren, die im Ablagerungsbereich positioniert sind, sind durch ihre relativ kurzen Vorwarnzeiten – gewöhnlich im Bereich von Minuten – limitiert. Obwohl dieses Zeitfenster ausreichend ist, um Kontrollsysteme wie Ampelschaltungen zu beeinflussen, erweist es sich als unzureichend für die Evakuierung von Personen (ebd.). Der zweite Mechanismustyp basiert auf der Auslösung von Alarmen bei Überschreitung festgelegter Grenzwerte der Niederschlagsintensität. Diese Systeme können entweder mit aktuellen Messdaten, beispielsweise von Niederschlagsmessgeräten oder Wetterrads, oder mit prognostizierten Daten betrieben werden. Während prognosebasierte Ansätze potenziell längere Vorwarnzeiten ermöglichen, die vom jeweiligen Prognosehorizont abhängen, geschieht dies auf Kosten einer reduzierten Präzision in der Vorhersage. Des Weiteren tendieren die Warnmeldungen dieser Frühwarnsysteme dazu, in Bezug auf die Lokalisation und Charakterisierung des erwarteten Ereignisses eher generischer Natur zu sein (ebd.). In der operativen Anwendung weisen Sensoren, die innerhalb des Muren-Fließkanals zur direkten Erfassung des Durchflusses installiert sind, eine hohe Zuverlässigkeit auf, erfordern jedoch umfangreiche Installations- und Wartungsarbeiten und bieten in der Regel nur eine sehr begrenzte Vorlaufzeit (COVIELLO 2023). Demgegenüber erlauben auf seismo-akustischen Sensoren basierende Frühwarnsysteme, platziert in unmittelbarer Nähe des Fließkanals, eine Verlängerung der Vorlaufzeit durch die Detektion des Murgangs weiter stromaufwärts. Dies liegt nicht nur an der Möglichkeit einer frühzeitigen Erkennung, sondern auch an der Fähigkeit, die Größenordnung des Murgangs abschätzen zu können (ebd.).

Im weiteren Verlauf werden drei Systemtypen vorgestellt, die für die Implementierung und den Betrieb von Monitoring- und Frühwarnsystemen verwendet werden. Diese Systeme sind nur einige Beispiele von vielen anderen Ansätzen und sollen beleuchten, was und wie erfasst wird.

5.2 Vorhersage meteorologischer Parameter mittels INCA-System

Das INCA-System ist ein fortgeschrittenes meteorologisches System, speziell konzipiert für die Analyse und kurzfristige Vorhersage von Wetterphänomenen in gebirgigen Regionen und erfüllt somit eine essentielle Rolle in Frühwarnsystemen von Muren. Es bietet detaillierte Analysen in meteorologischen Bereichen wie Temperatur, Feuchtigkeit, Wind, Niederschlagsmenge und -typ, Bewölkung sowie globale Strahlung (HAIDEN et al. 2011). In einigen Regionen Öster-

reichs wird eine erhöhte Inzidenz von Starkregenereignissen beobachtet, wie aus den Erkenntnissen der Untersuchung zur Funktionsweise von ILEWS hervorgeht: „*In Südtirol haben die Untersuchungen ergeben, dass die Muren vor allem durch Starkregenereignisse ausgelöst werden und der Vorregen keine Rolle spielt. Somit geht in das entsprechende Frühwarnmodell nur die Wettervorhersage ein.*“ (BELL et al. 2010b: 246).

Die Betonung auf Starkregenereignisse erfordert, dass das System schnell reagieren kann, da Starkregen oft plötzlich und mit wenig Vorwarnzeit auftritt. INCA integriert Daten von Bodenstationen mit Fernerkundungstechnologien und nutzt daraus abgeleitete Bewegungsmuster für Vorhersagen. Haiden et al. evaluieren in ihrem Artikel den operativen Bereich des INCA-Systems in Zentraleuropa (HAIDEN et al. 2011). Dieser Bereich deckt ein ausgedehntes Gebiet ab, das sich über die östlichen Alpen Österreichs erstreckt, also topografisch Bundesländer wie u.a. Vorarlberg, Tirol und Salzburg, und eine Flächenausdehnung von 600 km mal 350 km mit einer Maschengröße von 1 km hat. Die Studie zeigt, dass die Temperaturanalyse im INCA-System eine durchschnittliche Genauigkeit von 1,8 bis 1,58°C aufweist, wobei die geringsten Fehler in Tieflandgebieten und exponierten Bergstationen auftreten (ebd.). In Alpentälern ist der Fehler größer, hauptsächlich aufgrund ungenauer Informationen über Temperaturinversion – ein Phänomen, bei dem die Lufttemperatur mit zunehmender Höhe ansteigt, anstatt wie üblich abzunehmen. Die Kombination von Radar- und Regenmessdaten, ergänzt um die Berücksichtigung von Höheneffekten, ist entscheidend für nützliche Niederschlagsanalysen im östlichen Alpenraum. Die Beziehung zwischen Radarwerten und Regenmessdaten variiert jedoch stark und der durchschnittliche relative Fehler bei 15-minütigen Niederschlagsmengen liegt zwischen 50 und 100 Prozent. Nowcasting-Methoden sind in der Lage, Beobachtungen nahezu in Echtzeit zu integrieren, typischerweise bis zu einer Vorlaufzeit von zwei bis drei Stunden für Niederschlag und bis zu sechs Stunden für Temperatur (ebd.). Die Leistungsfähigkeit des INCA-Systems bei der Detektion und Quantifizierung von Niederschlagsereignissen hat sich laut einer weiteren Studie kontinuierlich verbessert und es wurde eine Reduktion der Fehlerraten neuerer Radarsysteme seit 2015 festgestellt (GHAEMI et al. 2021). Die Studie untersuchte die Entwicklung von 2007 bis 2018. Trotz dieser Fortschritte existieren spezifische Fehlerquellen was die Höhe der Radarerkennung sowie den Algorithmus zur Integration von Radardaten betrifft. Ferner verdeutlicht die Studie die essentielle Rolle von Bodenmessgeräten bei der Korrektur bestimmter Fehler, die durch Radarschätzungen entstehen, und betont damit ihre Bedeutung für die Verbesserung der Gesamtgenauigkeit der Niederschlagsmessungen (ebd.).

GeoSphere Austria betreibt in Zusammenarbeit mit dem Land Tirol und dem Bezirk Imst das Starkregeninformationssystem für die Hahntennjochstraße (SCHELLANDER 2023). Es nutzt Daten des Nowcast-Analysesystems INCA, das alle fünf Minuten Niederschlagssummen berechnet und prognostiziert. Das System soll die Straßenbetreiber vor Murenabgängen im weitesten Sinn warnen. Dabei wird angenommen, dass ein typischer Murenabgang in dieser Region durch ein Niederschlagsereignis einer bestimmten Größenordnung ausgelöst wird. Diese Größenordnung wird über Schwellenwerte für „Niederschlagsmenge pro Dauerstufe“ definiert, die man aus Diskussionen mit Fachleuten (z.B. Hydrologen) gewinnt (ebd.). Für die Hahntennjochstraße wurde ein spezifisches Polygon auf dem Österreich-Gitter definiert. Überschreitet ein Gitterpunkt im Polygon die definierten Schwellenwerte, generiert das System eine spezielle Blaulicht-E-Mail, die beim Land Tirol verschiedene Prozesse in Gang setzt. Unter anderem wird damit die Ampelanlage an den beiden Anfangspunkten der Hahntennjochstraße (Bezirk Imst und Bezirk Reutte) vollautomatisch auf Rot gesetzt. Das System wird während des Sommerhalbjahres rund um die Uhr betrieben und zu Saisonbeginn getestet. Die Güte des Systems hängt von Faktoren ab wie Genauigkeit der INCA-Prognose und Art des Niederschlagsereignisses. Es wird jährlich im Frühjahr aktiviert, nachdem die Straße nach der Wintersperre freigegeben wird, und im Herbst nach Saisonende wieder deaktiviert. Die Schwellenwerte wurden in den ersten Betriebsjahren angepasst, wobei eine Tendenz zur Überwarnung besteht (ebd.).

5.3 Erkennung und Identifizierung von Murgängen mittels MAMODIS-System

Vorangegangene wissenschaftliche Untersuchungen haben offenbart, dass sedimentbezogene dynamische Prozesse, wie Murgänge, distinkte seismische und akustische Signaturen im Infraschallfrequenzbereich generieren, die effektiv für die Detektion solcher Ereignisse herangezogen werden können (SCHIMMEL & BERTI 2023). MAMODIS repräsentiert ein Detektionssystem für derartige geodynamische Phänomene, welches auf der synergetischen Verwendung von Infraschall- und seismischen Signalen basiert. Konstituierende Elemente dieses Systems umfassen einen Infraschallsensor, ein Geophon sowie einen Mikrocontroller (ebd.). Es ist von entscheidender Bedeutung, dass sowohl die Auswahl der Sensorik als auch die Bestimmung des Installationsortes mit größter Sorgfalt erfolgen. Darüber hinaus erfordert die spezifische Natur der jeweiligen Anwendung und das charakteristische Hintergrundgeräuschniveau am vorgesehenen Standort eine sorgfältige Anpassung der Parameter des Erkennungsalgorithmus (ebd.).

Die Installationspunkte von MAMODIS sind in Österreich in der Nähe von Seefeld im Bezirk Innsbruck-Land in Tirol, in Rotgraben im Gesäuse südlich des Großen Buchsteins im Bereich des Rauchbodens, in Kühgraben im nördlichen Teil der Gesäuseberge und am Lattenbach-Wildbach in Tirol. Letzteres zeichnet sich durch eine hohe Aktivität an sedimentdynamischen Prozessen aus, bedingt durch ihre Lage in einer geologischen Störungszone, was eine reichhaltige Verfügbarkeit an lockeren Sedimenten zur Folge hat (MAMODIS o.J.).

5.4 Sensorbasierte Überwachung mittels AMM-System

Das Konzept des Detektionssystems AMM basiert auf der Errichtung einer Sensorik-Konfiguration, bestehend aus einem Infraschallsensor und einem seismischen Sensor am identischen Standort, kombiniert mit einer Datenverarbeitung in Echtzeit direkt vor Ort und realisiert durch den Einsatz eines Mikrocontrollers (HÜBL et al. 2016). Diese technologische Lösung ermöglicht eine Installation in unmittelbarer Nähe von potenziell gefährdeten Wildbachgebieten. Mögliche Anwendungsbereiche eines derartigen Systems umfassen beispielsweise den Schutz von Verkehrswegen wie Straßen und Eisenbahnstrecken, wobei dies durch die Steuerung von Signal- und Ampelanlagen realisiert werden könnte (ebd.). Das AMM-Detektionssystem wurde an den Murenbeobachtungsstationen Farstrinne, Lattenbach, Dristenau, Wartschenbach und Schüsserbach getestet (siehe Abbildung 3).



Abbildung 3 - Karte der Testgebiete seit 2013. (HÜBL et al. 2016: 7)

Die Farstrinne in der Nähe von Umhausen im Ötztal in Tirol ist ein Testgelände des IAN. Das hydrologische Einzugsgebiet, welches eine Fläche von über 5,5 km² umfasst, ist seit Juli 2013 mit einem Detektionssystem ausgestattet, das einen Chaparral-Infraschallsensor und ein SG-5

Geophon beinhaltet (ebd.). Die Installation der Monitoringanlage sieht folgendermaßen aus (siehe Abbildung 4):



Abbildung 4 - Übersicht des Einzugsgebietes und der Monitoringstationen in Farstrinne und der Position des Detektionssystems. (HÜBL et al. 2016: 8)

Der Dristenauerbach, lokalisiert in den nördlichen Kalkalpen in der Nähe von Pertisau in Tirol, erstreckt sich über ein Einzugsgebiet von circa 9,9 km² und ist charakterisiert durch häufig auftretende, kleinere Ereignisse, die Sedimenttransport und murenartige Prozesse involvieren. Im oberen Flussabschnitt sind zwei Messstationen installiert, ausgestattet mit Niederschlagswaage, Videokamera und Radar. Das Warnsystem, bestehend aus einem MK-224 Infra-schallsensor und einem SM-4 Geophon (2013) bzw. einem SG-5 Geophon (2014), wurde im Juni 2013 in der Nähe der Station 1 implementiert (ebd.). Die Installation der Monitoringanlage ist auf den folgenden Bildern zu sehen (siehe Abbildung 5):



Abbildung 5 - Übersicht des Einzugsgebietes und der Monitoringstationen in Dristenau und der Position des Detektionssystems. (HÜBL et al. 2016: 11)

Aus den Untersuchungen im Gelände ergibt sich, dass ein tiefgreifendes Verständnis der Ausbreitungs- und Dämpfungsmechanismen von seismischen und Infraschallwellen sowie der Charakteristika des Hintergrundrauschens und der Störgeräusche entscheidend für die Interpretation der seismischen und Infraschallsignale und für die Entwicklung eines effektiven Detektionsalgorithmus ist (ebd.). Die Analyse bekräftigt, dass die Kombination von Infraschall- und seismischen Sensoren prinzipiell für die automatische Detektion alpiner Massenbewegungen geeignet ist. Allerdings ist eine umfangreichere Datenbasis von Murenereignissen erforderlich, um den Detektionsalgorithmus zu validieren und genauere Aussagen über die zu erwartenden Vorwarnzeiten treffen zu können (ebd.).

6. Einflussfaktoren auf Muren: Geologie, Klima und Mensch

In diesem Kapitel werden die Einflussfaktoren auf Muren und die Genese mur-artiger Prozesse untersucht, um ein Verständnis über deren Dynamik und somit auch über den Einsatz von Frühwarn- und Monitoringsystemen zu bekommen. Muren sind plötzliche und oft unvorhersehbare Naturereignisse, die durch ihre hohe Geschwindigkeit und enorme Kraft charakterisiert werden. Sie können folgendermaßen definiert werden:

„Langsam bis schnell abfließende Suspension aus Wasser, Feststoffen und Wildholz, die sich entwickelt, wenn in kurzer Zeit große Geschiebemengen verfügbar sind. Entstehung überwiegend in Wildbächen und an steilen Hängen (Rinnen).“ (RUDOLF-MIKLAU 2009: 26ff.).

„Nach der Klassifikation von Hungr et al. (2001) werden Muren als schnell bis extrem schnell ($> 5 \text{ m/s}$) fließende Mischungen von gesättigtem Lockermaterial beschrieben. Abhängig von der Korngrößenverteilung des Sediments und des Wassergehaltes unterscheidet man zwischen Schlammuren (engl. »mudflow«) und granularen Muren (engl. »granular debris flows«).“ (KAITNA et al. 2020: 490). Davies unterteilt die Charakteristik von Muren in Murentyp 1, 2 und 3 abhängig vom Fließverhalten, Körnung, Kornverteilung, Dichte, Viskosität, Geschwindigkeit und Verhalten zur Sohle (JÄGER 2004; siehe auch DAVIES 1988).

In der Studie von Schlögl wurden Daten zu ungefähr 12.000 Ereignissen von Wildbächen analysiert, die zwischen 1961 und 2017 in Österreich Schäden verursachten (SCHLÖGL et al. 2021). Diese Daten wurden in Beziehung gesetzt zu Informationen über Siedlungsaktivitäten, Maßnahmen zur Wildbachverbauung und zu 15 verschiedenen Klimaindizes, die unter anderem

die Häufigkeit und Intensität von Starkregenereignissen aufzeigen. Nicht nur klimatische Änderungen haben ihre Auswirkung auf alpine Naturgefahren, sondern auch sozioökonomische Dynamiken. Aus der Studie ist ersichtlich, dass eine auf die Auswirkungen des Klimawandels fokussierte Debatte in einem ganzheitlichen Blickwinkel genommen werden muss. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die durch den Klimawandel erwartete Zunahme an Niederschlagsereignissen, die als Auslöser für u.a. Muren dienen, durch die in den letzten Jahren durchgeführten Minderungsmaßnahmen kompensiert werden konnte. Dennoch wird angenommen, dass bei einer kontinuierlichen Intensivierung von auslösenden Niederschlagsereignissen es zu mehr schadensverursachenden Ereignissen kommen könnte (ebd.). So ist z.B. seit 1960 die Anzahl der von der WLW unter der Leitung des forsttechnischen Dienstes errichteten Schutzbauwerke in Österreich fast um das Dreifache angestiegen (ebd.).

6.1 Gefahrenprofil in Österreich

Welche Arten und Dynamiken gravitativer Naturgefahren weist der alpine Raum Österreichs auf? Die topographische Beschaffenheit Österreichs ist maßgeblich durch Mittel- und Hochgebirgsstrukturen charakterisiert (SATTLER & MEHLHORN 2020). Das Land ist geologisch durch eine relativ junge und kontinuierliche Reliefentwicklung geprägt, die maßgeblich durch die alpidische Orogenese sowie die daraus resultierenden quartären klimatischen Veränderungen (glaziale und postglaziale Prozesse) beeinflusst wurde (LOTTER & HABERLER 2013). Gemäß der Abgrenzung durch die Alpenkonvention (2018) zählen annähernd zwei Drittel des Staatsgebiets Österreichs zum Europäischen Alpenraum (ebd.; siehe auch SAUERMOSER & STEINER 2016). Diese gebirgige Topographie, in Kombination mit den vorherrschenden klimatischen Bedingungen, resultiert in der Eignung von lediglich circa 22 Prozent des als österreichischer Alpenraum definierten Gebiets für eine permanente Besiedlung (SATTLER & MEHLHORN 2020).

Etwa 67 Prozent des österreichischen Staatsgebietes liegen in Wildbach- und Lawineneinzugsgebieten, wobei ungefähr 120.000 Gebäude und 1.500 km Verkehrswege dem Risiko ausgesetzt sind (siehe Abbildung 6) (RUDOLF-MIKLAU 2009; siehe auch DRAGOVIĆ 2022). In den Bundesländern Vorarlberg, Tirol, Kärnten und Salzburg umfassen diese Gebiete mehr als 80 Prozent der Landesflächen (ebd.). Die Dokumentation der Murenereignisse durch die WLW zeigt folgendes Bild: *„Auf dem Bundesgebiet von Österreich wurden seit dem Jahr 1800 rund 5.000 Murgänge registriert, von denen etwa 3.700 Ereignisse eine subjektive Intensitätsangabe*

(gering, mittel, stark und extrem) haben. Davon sind 230 Ereignisse als extrem bewertet worden. [...] Wichtig zu betonen ist aber, dass diese Daten nicht unbedingt den Verlauf der natürlichen, ungestörten Aktivität von Muren in Österreich darstellen, sondern stark von geändertem Siedlungsraum, der Beobachtung (inklusive der subjektiven Wahrnehmung) und dem Effekt von Schutzmaßnahmen beeinflusst sind.“ (Kaitna et al. 2020: 493).

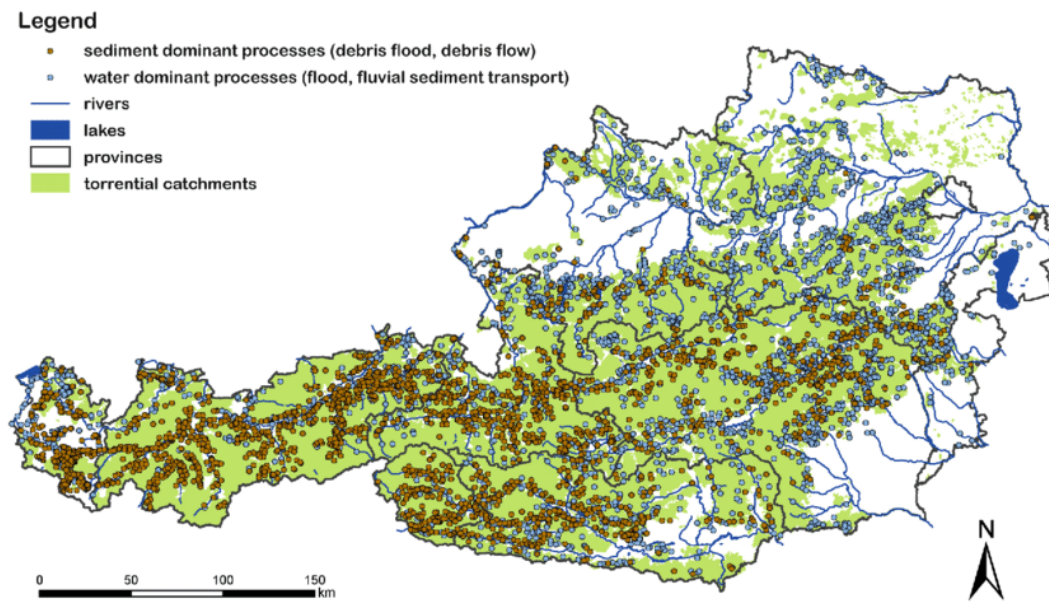


Abbildung 6 - Räumliche Verteilung der Wildbachereignisse in Österreich. (DRAGOVIC et al. 2022: 45; siehe auch HÜBL et al. 2009: 57)

Etwa zehn Prozent der in Österreich dokumentierten Murenereignisse mit Schadensauswirkungen haben ihren Ursprung in Einzugsgebieten, in denen mehr als fünf Prozent der Fläche von Permafrost geprägt sind. In diesen spezifischen Einzugsgebieten ist eine erhöhte Frequenz von Murgängen zu verzeichnen, wenngleich diese in der Regel eine geringere Magnitude aufweisen als Murgänge in permafrostfreien Einzugsgebieten (KATINA & HUBER 2017). In der Rangliste der Naturgefahren in Österreich belegen Murgänge den fünften Platz mit einem hohen Personenrisiko, einem mittleren Schadensrisiko und einem mittleren Katastrophenpotenzial (RUDOLF-MIKLAU 2009).

6.2 Auslösefaktoren

Folgende anthropogene Entwicklungstendenzen zeigen eine kritische Wechselwirkung mit Auswirkungen von Muren:

- Zu beobachten ist eine verstärkte Flächennutzung in Hanglagen, die primär durch den Anreiz der Aussicht und Lebensqualität sowie durch die Verknappung von Bauland in

topographisch weniger anspruchsvollen Regionen angetrieben wird. Diese Entwicklung führt zu einer verstärkten Inanspruchnahme von Berghängen für Bauland und andere wertvolle Nutzungsformen (ÖROK 2016).

- Ein Trend zur intensiven Landschaftsversiegelung ist erkennbar, der durch verschiedene Faktoren wie die Bevorzugung von Einfamilienhäusern, die Entwicklung von Industrie- und Gewerbegebieten mit überwiegend eingeschossigen Strukturen, die Errichtung von großflächigen Einkaufs- und Freizeitzentren sowie die touristische Erschließung in Alpentälern vorangetrieben wird. All dies verbirgt wiederum Implikationen für das Wasser- und Hangwasserregime. Auch spielt die kontinuierlich wachsende Bevölkerungsdynamik eine wesentliche Rolle (SINABELL 2014).
- Schließlich führt der Verlust traditioneller land- und forstwirtschaftlicher Nutzungsformen, auch bekannt als Deagrarisierung, ebenfalls zu einer Veränderung des Oberflächenabflusses und Hangwasserregimes (ÖROK 2016).

Folgende natürliche Auslösefaktoren von Muren können genannt werden:

- Porenwassersättigung und -überdruck in Lockergesteinen, hervorgerufen durch Niederschlagsereignisse (LOTTER & HABERLER 2013). Üblicherweise sind das Regenschläge von kurzer Dauer und hoher Intensität (WIECZOREK & GLADE 2005; siehe auch HÜRLIMANN et al. 2019).
- Die tonmineralogischen Eigenschaften der Lockergesteine sowie die mechanischen Eigenschaften der veränderlich festen Gesteine in Abhängigkeit vom Wassergehalt spielen ebenfalls eine Rolle (ebd.).
- Wesentlich sind auch die Vorfeuchte, Schneemengen und -schmelze, temporäre glaziale und fluviatile Erosionsprozesse, Anstieg von Hang- oder Grundwasser durch Hochwasser, Trockenheit mit Versiegelungseffekten oder Trockenrissen, seismische Aktivitäten, Stürme sowie klimatische Veränderungen der Vegetation, die den Wurzelraum und das Niederschlags-Abflussverhalten beeinflussen (ebd.).

Bei Murgängen in alpinen Regionen kann der maximale Abfluss Werte von mehreren 100 m³/s erreichen. Beobachtungen haben gezeigt, dass die Höhe der Murenfront bis zu 10 m betragen kann, mit geschätzten Fließgeschwindigkeiten von bis zu 15 m/s (entsprechen 54 km/h) (KAITNA 2022b). Bei größeren Murenereignissen kann das Volumen der transportierten Feststoffe bis hin zu mehreren 100.000 m³ umfassen (ebd.). In hochalpinen Gebieten resultiert der Gletscherrückgang, das Abschmelzen von Permafrost und eine Intensivierung der physikalischen Verwitterung in einer gesteigerten Verfügbarkeit von Sedimenten (KAITNA 2022a). Diese Sedimente werden durch fluviale Systeme in niedrigere Lagen transportiert. Im Gegensatz dazu konnte in mittleren Höhenlagen eine Reduktion der Sedimentproduktion aufgrund physikalischer Verwitterungsprozesse beobachtet werden, was in Einzugsgebieten, die durch Sedimentmangel gekennzeichnet sind, potenziell zu einer Verringerung der Murgangaktivität führt (ebd.). In Regionen mit umfangreichen eiszeitlichen Ablagerungen dürfte sich die Sedimentdynamik weniger stark verändern. Die generelle Tendenz zu trockeneren Sommern könnte zu einer vermehrten Sedimentakkumulation in Fließgewässern führen, was bei starken Niederschlagsereignissen die Magnitude der hydrologischen Ereignisse erhöhen könnte (ebd.; siehe auch STOFFEL & CORONA 2018).

Die Debatte um die Klimakrise und den damit verbunden Folgen für die Umwelt ist in diesem Zusammenhang mit Vorsicht zu betrachten (RUDOLF-MIKLAU 2022). In den vergangenen Jahrzehnten wurden in spezifischen alpinen Einzugsgebieten Anzeichen für eine intensivierte Aktivität von Murgängen identifiziert, exemplarisch illustriert durch die Beobachtungen einer Studie in der Region Plansee (KAITNA 2022a). Im Gegensatz dazu wurde für andere Lokaltäten, wie beispielsweise den Rittigraben in der Schweiz, keine signifikante Zunahme dieser Phänomene verzeichnet. Trotz der Verifizierung eines Anstiegs meteorologischer Indikatoren, welche potentiell kritische Voraussetzungen für die Initiation schadensinduzierender Murgängen, darstellen könnten, verzeichnet die erwähnte Untersuchung innerhalb der österreichischen Alpen keinen distinkten Trend hinsichtlich der Frequenz und Intensität dieser schadensverursachenden Ereignisse. Diese Beobachtung wird durch die Implementierung und den Ausbau technischer Schutzvorkehrungen erklärt, deren Effizienz offenbar eine signifikante Minderung der Schadensereignisse bewirkt hat (ebd.). Worauf der Klimawandel in der Tat eine Auswirkung hat, sind die Auslösebedingungen von Muren. Im Laufe der nächsten Jahrzehnte kann die Frequenz der Ereignisse, bei denen Regen auf Schneedecken fällt, in den europäischen Alpen zunehmen, was einen möglichen Auslösefaktor von Murgängen darstellt. So wird für die Schweiz eine temporale Verschiebung der Murgangaktivität von den traditionellen Sommermonaten hin

zu den Übergangszeiten im Frühjahr (März, April) und im späten Herbst (November, Dezember) prognostiziert (ebd.; siehe auch STOFFEL & CORONA 2018). Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten kritischer Auslösebedingungen, die Muren und weitere Wildbachprozesse initiieren, variiert regional sowie saisonal. Insbesondere zeigt sich eine Tendenz, dass Muren bereits früher im Jahresverlauf auftreten können (ebd.).

Beispielsweise wurden in Österreich im Juli 2022 außergewöhnliche meteorologische Phänomene registriert, wobei dieser Monat als einer der zwanzig trockensten Julimonate seit dem Beginn meteorologischer Aufzeichnungen identifiziert wurde (BML 2023). Der Niederschlag lag landesweit um 30 Prozent unter dem Durchschnitt eines typischen Julis. Trotz der Verzeichnung signifikanter Unwetter mit intensiven Regenfällen in spezifischen Regionen, die zu Murenabgängen und lokalen Überschwemmungen führten, zeichnete sich der Großteil des Monats durch eine ausgeprägte Niederschlagsarmut aus. Eine erhöhte Niederschlagsaktivität wurde primär zu Beginn und gegen Ende des Monats beobachtet (ebd.). Insbesondere in den Regionen vom Ennstal bis ins Mittelburgenland sowie von St. Pölten bis Graz wurde zu Monatsbeginn ein relativer Anstieg der Niederschlagsmengen verzeichnet, wobei die Niederschlagsintensität ab dem 7. Juli signifikant abnahm. Innerhalb der betrachteten Datensammlung vom BML dominierten im Jahr 2022 fluvatile Prozesse, einschließlich Hochwasser und fluvialer Feststofftransport, mit 131 Ereignissen, was etwa 75 Prozent der Gesamtanzahl der Ereignisse entspricht, gegenüber mur-artigen Prozessen, die 44 Ereignisse und somit rund 25 Prozent ausmachten. Letztere werden anhand des Verlagerungsprozesses in den Kategorien „Mur-artiger Feststofftransport“ und „Murgang“ unterteilt (ebd.; siehe auch ONR 24800). Die exakten Auslösemechanismen von Murgängen in Österreich werden in der Regel spezifisch für einzelne Ereignisse identifiziert, vornehmlich im Rahmen einer umfassenden Ereignisanalyse und Dokumentation. So illustriert die Untersuchung von dokumentierten Fallbeispielen (u.a. Pitztal, Gailtal, Paltental), dass Gewitter den größten Auslösetyp ausmachen (KAITNA et al. 2020).

6.3 Position der Messgeräte und geologische Merkmale der Einzugsgebiete

Die strategische Platzierung von Messsensoren ist von essentieller Wichtigkeit – dies erfordert eine präzise Kalibrierung, die nicht nur die Variabilität der zugrunde liegenden Prozessbedingungen berücksichtigt, sondern auch gezielt auf die Schutzanforderungen der beteiligten Interessengruppen abgestimmt ist (KIENHOLZ 2003).

	Different scenarios of threat		
	Basic disposition	Variable disposition	Triggering event
Starting zone (upper catchment)	Subsoil relief water vegetation climate	Water saturation state of vegetation cover weather conditions	Kind of disturbance earthquake weather man
Transition zone (channel and its slopes)	Subsoil relief trajectories transportation capacity vegetation cover	State of soil and subsoil state of trajectories (for example clogging situation)	Disturbance (for exam- ple clogging situation)
Deposition zone (runout zone) (debris fan)	Subsoil relief trajectories deposition capacity vegetation cover obstacles	State of soil and subsoil state of trajectories	

Abbildung 7 - Start-, Übergangs- und Ablagerungsbereich. (KIENHOLZ 2003: 559; siehe auch HÜBL et al. 2014: 10)

Im Initialbereich, der durch eine spezifische Disposition wie Vegetation und ein geeignetes Auslöseereignis charakterisiert ist, erfolgt die Lockerung des Materials, wie in Abbildung 7 angeführt. Dieses Material durchquert daraufhin häufig eine Übergangszone, deren Länge variieren kann – die Disposition für gefährliche geomorphologische Prozesse in gebirgigen Regionen reflektiert die Bereitschaft natürlicher Elemente sich bergab zu bewegen. Vorgänge wie Muren, aber auch Felsstürze mit kleineren Komponenten, tendieren dazu, sich in steilen Rinnen und Kanalsystemen zu sammeln (KIENHOLZ 2003). Bezüglich des Übergangs- bzw. Transportbereichs ist festzuhalten: „Für das Monitoring von Murgängen stellt der Transportbereich die maßgebliche Beobachtungsstrecke dar, da in diesem Abschnitt die wesentlichen Parameter zur Beschreibung der Prozessdynamik erfasst werden können.“ (HÜBL & MATJAZŽ 2014: 55ff.). Die grundlegende Disposition bezeichnet eine allgemeine, langfristig bestehende Neigung zu solchen Prozessen, die durch relativ konstante Parameter wie Topographie, Geologie, Klima und Vegetationsdecke bestimmt wird, wobei zu beachten ist, dass gewisse Parameter langfristige Veränderungstrends aufweisen können. Im Gegensatz dazu bezieht sich die variable Disposition auf zeitlich variierende Prozesse, die durch saisonal wechselnde oder meteorologisch beeinflusste Parameter wie Schneedecke oder Bodenwassersättigung definiert werden. In den Talbereichen kollidiert das Material, dessen Bewegungsgeschwindigkeit variieren kann, mit landwirtschaftlichen Flächen, Siedlungen und Verkehrswegen und kann dort auf verschiedene Weisen Schäden anrichten ((KIENHOLZ 2003). In der Modellierung von Murgängen stellt die präzise Einschätzung der Ausgangslage eine fundamentale Herausforderung dar: Wo

wird der Ursprung des Murgangs lokalisiert? Wie kann die Ganglinie, welche die zeitliche Entwicklung von Volumenstrom und Geschwindigkeit des Materials abbildet, vorhergesagt werden? (KAITNA et al. 2020).

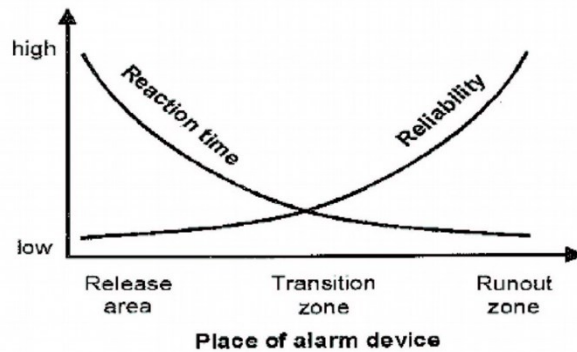


Abbildung 8 - Zuverlässigkeit und Reaktion der Frühwarnung in Abhängigkeit vom Standort des Alarmgeräts. (KIENHOLZ 2003: 560; siehe auch HÜBL et al. 2014: 11)

Für eine präzise Bewertung, um festzustellen, wo Sensoren installiert werden sollen, ist eine detaillierte Untersuchung der Bewegungsdynamik (Kinematik und Kinetik) der betrachteten Phänomene in allen Zonen erforderlich: Eine Positionierung nahe der Depositionszone erhöht die Zuverlässigkeit der Warnindikatoren, reduziert jedoch die zur Verfügung stehende Reaktionszeit. Eine Installation in höheren Lagen (Startbereich) ermöglicht eine frühere Alarmierung, steigert jedoch gleichzeitig das Risiko falscher Alarmer (siehe Abbildung 8) (ebd.).

Der Zeitfaktor, einschließlich der Vorwarnzeit und der Reaktionszeit, ist eine kritische Determinante für die Wirksamkeit von Frühwarnsystemen: „Für jede Form der Frühwarnung ist die Zeit-Dimension der entscheidende Faktor.“ (MAYER 2010a: 18). Es muss sorgfältig zwischen dem Bedarf an frühzeitiger Erkennung eines Murgangs und der Vermeidung falscher Alarmer abgewogen werden, um die Effektivität von Frühwarnsystemen zu maximieren. Durch die Charakterisierung der Eigenschaften eines Einzugsgebiets können Risikobereiche identifiziert werden. Mögliche Analyse Kriterien der Einzugsgebiete umfassen Größe, Disposition (Geologie, Vegetation, Relief, Boden, Klima), aktuelles Gefahrenpotential, Art der Naturgefahr, zeitliche Dimension der Gefährdung (dauerhaft, wiederkehrend, bis zum Ereignis), Vorwarnzeit, Ereignishäufigkeit und -wahrscheinlichkeit und Schadenspotential (WILDBACH- UND LAWI-NENVERBAUUNG 2008). Wichtig ist auch festzustellen, ob es sich um einen kontinuierlichen oder einen schnell aufbauenden Prozess handelt (SÄTTELE & BRÜNDL 2015; siehe auch HEISTERKAMP et al. 2016). Das Hochfrequenz-Radar als Messsensor arbeitet etwa so, dass sich der Startpunkt der Messung im Ablagerungsbereich befindet und die Richtung des Messfeldes

von unten auf den Transportbereich hinaufblickend mit einer Erfassungslänge zwischen 700 und 800 m eingestellt ist. Die Vorwarnzeit beträgt zwischen einer bis eineinhalb Minuten (KOSCHUCH 2024). Prinzipiell ist es im Sinne einer längeren Reaktionszeit besser, die Detektionssysteme so weit wie möglich gerinneaufwärts zu positionieren, unter der Voraussetzung, dass die natürlichen Gegebenheiten die Sensoren z.B. durch Steinschlag nicht zerstören (GRAF et al. 2007).

Wie lassen sich von Muren betroffene Gebiete charakterisieren? Die penninische Flyschzone und die Klippenzonen, beispielsweise im Raum Scheibbs oder Waidhofen/Ybbs in Niederösterreich, zeigen aufgrund ihrer verwitterungsempfindlichen Festgesteine eine hohe natürliche Prädisposition für großflächige Rutschprozesse (LOTTER & HABERLER 2013). Die im Westen gelegenen Gebiete wie Montafon, Pitztal und Defereggental zeichnen sich durch einen hochalpinen Charakter aus mit 3000 Hm über dem Meeresspiegel und einer hohen Murenaktivität (KAITNA et al. 2023). Dies steht im Kontrast zu den östlichen Regionen, die als submontan bis montan klassifiziert werden und einen geringeren Höhenbereich aufweisen, beispielhaft genannt werden soll das Feistritztal in der Steiermark mit Höhen zwischen 400 und 1.600 m über dem Meeresspiegel (ebd.). Die Größe der Einzugsgebiete kann von 0,42 km² (Suggadinbach/St. Gallenkirch) bis 10 km² (Dristenau) und mehr variieren. So ist die Geologie des Gebirgsverbandes im Einzugsgebiet des Mäßtobels in Vorarlberg durch talparallele, steil stehende Störungsbündel und das Einfügen eines wasserstauenden Glimmerschieferverbandes zwischen harten Hornblendegesteinen geprägt. Das führt zu hangstabilitätsbestimmenden Phänomenen wie die plastische Verformung der weicheren Glimmerschieferlage unter dem Gewicht der darüberliegenden harten Amphibolite, was Brüchen und Auflösung in Grobblöcken zur Folge hat (WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG 2008). Das Gebirge nördlich von Lienz in Tirol, das den südlichen Ausläufer der Schobergruppe, eine Gebirgsgruppe der Zentralen Ostalpen, darstellt und zum geologischen Komplex des Altkristallins zählt, besteht hauptsächlich aus kristallinen Schiefergesteinen, einschließlich Gneis, Glimmerschiefer und Phyllit (WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG 2008). Diese Region rund um den Wartschenbach ist durch eine west-östliche Streichrichtung der Falten gekennzeichnet. Die Neigung dieser Gesteine zur leichten Verwitterung, kombiniert mit ihrer steilen Lagerung, fördert die ausgeprägte Bildung von Schwemmkegeln. Im höchstgelegenen Teil des Einzugsgebiets ist eine deutliche glaziale Prägung erkennbar, die sich in teilweise erhaltenen Gletscherschliffen auf exponierten

Felsrücken und variabel mächtigen Moränenablagerungen auf den glazial geformten Schulterlagen manifestiert. Die Größe des Einzugsgebiet beträgt 2,6 km² und betrifft die Gemeinde Nussdorf-Debant (ebd.).

7. Fallbeispiele von Frühwarn- und Monitoringsystemen für Muren

Dieses Kapitel widmet sich der detaillierten Analyse von Frühwarn- und Monitoringsystemen für Muren anhand von zwei ausgewählten Fallbeispielen aus der Praxis in den Regionen Tirol (Bezirk Landeck) und Vorarlberg (Bezirk Bludenz).

Derzeit existiert in Österreich eine begrenzte Anzahl von Frühwarn- und Monitoringsystemen (RUDOLF-MIKLAU 2023). Exemplarisch zu nennen sind die Anlagen mit potentieller Frühwarnfunktion am Suggadinbach in St. Gallenkirch, am Lattenbach in Pians sowie am Wartschenbach in Nußdorf-Debant (Tirol). Diese Systeme fungieren in ihrer aktuellen Form primär als Prototypen und illustrieren den Entwicklungsstand in diesem spezialisierten Bereich der Katastrophenvorsorge (ebd.; siehe auch JÄGER & MOSER 2008). Die WLW selbst betreibt Monitoringanlagen, aber keine Frühwarnsysteme. Kunden sind „Wegehalter“ wie ÖBB, ASFINAG, Skilifte oder einzelne Gemeinden (MOSER 2024; siehe auch RUDOLF-MIKLAU 2009). In Österreich gibt es laut Stand 2019, 34 Monitoringstellen, neun davon in Tirol (OSTERMANN & AMABILE 2019). Im allgemeinen Zustandsbericht über Frühwarn- und Monitoringsysteme in Österreich sind spezifisch für Murgänge drei Monitoringstationen in Tirol (Dristenau, Lattenbach, Wartschenbach), zwei in Salzburg (Schmittenbach, Schlapftopfsperre) und eine in Niederösterreich (Gallenzerkogelmure) angeführt (ebd.). Aktive Frühwarnsysteme sind in der Minderheit: Gegenwärtig gibt es u.a. ein Detektionssystem für Muren, welches mittels Puls-Doppler-Radar operiert, im Kaunertal und in der Steiermark am Rosensteinergraben. In weiterer Folge werden in diesen Regionen im Fall von bedrohlichen Mureignissen die naheliegenden Straßen durch rote Verkehrsampeln abgesperrt. Ein weiteres Hochfrequenz-Radar ist in Vorarlberg am Mosonbach für die ÖBB (KOSCHUCH 2024). Manche der Einzugsgebiete sind zwar exemplarisch für das Aufzeigen der Funktionsweise von Frühwarn- und Monitoringanlagen, aber insofern nicht mehr gegenwärtig relevant, da diese kurzfristig im Rahmen von Bauarbeiten zum Einsatz kamen wie es in Strengen (SCHÖFFL et al. 2020) und am Gallenzerkogel (KIENBERGER 2020) der Fall war.

7.1 Lattenbach

Fallbeispiel 1

Einzugsgebiet

Größe: Die Gesamtfläche des Einzugsgebiets beläuft sich auf circa 5,3 km².

Lage: Das Einzugsgebiet befindet sich an der Schnittstelle der Lechtaler Alpen (nördlichen Kalkalpen) und der kristallinen Alpen (Quarzphyllit- u. Phyllitgneiszone) in Tirol, erstreckt sich über ein vertikales Relief von über 2 km auf einer horizontalen Entfernung von 4,5 km. Es reicht vom Dawinkopf-Gipfel auf 2.968 Hm bis zur Einmündung in den Fluss Sanna in der Gemeinde Pians auf 858 Hm (siehe Abbildung 9).

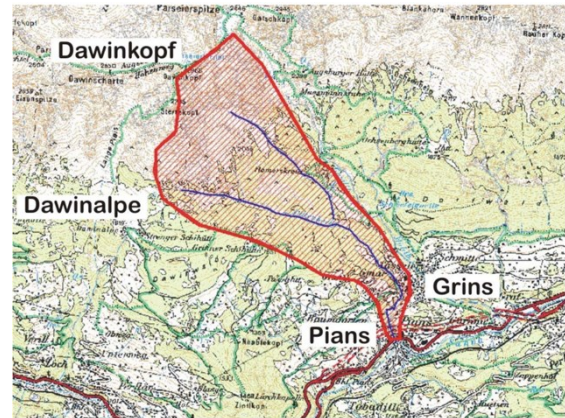


Abbildung 9 - Geografische Lage des Einzugsgebiets Lattenbach. (HÜBL et al. 2003: 2)

Betroffene Gemeinden: Gemeinde Pians und Gemeinde Grins.

Geologie: Im oberen Abschnitt des Einzugsgebiets existieren zwei primäre Fließgewässer: der Lattenbach an der westlichen und der Radunbach an der östlichen Seite. Diese beiden Bäche konvergieren auf einer Höhe von 1.160 m, ungefähr 1,7 km stromaufwärts des Einzugsgebietsauslaufs. Diese Gegend ist tektonisch stark beansprucht, was zu bewegten und instabilen Grabeneinhängen führt.

Temperatur und Niederschlag: Die durchschnittliche Monatstemperatur variiert zwischen -1,4 °C und 17,4 °C im Tal und zwischen -5,2 °C und 6,1 °C auf dem Dawinkopf-Gipfel. Die jährliche Niederschlagsmenge ist aufgrund der Beschattung durch das nördliche Gebirge mit etwa 750 mm relativ niedrig.

Ereignisse: Im Zeitraum von 2005 bis 2020 wurden von den Monitoringstationen insgesamt 16 Murenereignisse erfasst, was einer mittleren Häufigkeit eines Ereignisses pro Jahr gleichkommt. Das voluminöseste Ereignis wurde im Jahr 2016 mit einem Gesamtvolumen von 46.080 m³ verzeichnet. Über den gesamten Beobachtungszeitraum hinweg wird der Jahresdurchschnitt auf 15.712 m³ Murenvolumen geschätzt. (AIGNER et al. 2023; siehe auch HÜRLIMANN et al. 2019; siehe auch OSTERMANN & AMABILE 2019)

Entwicklung



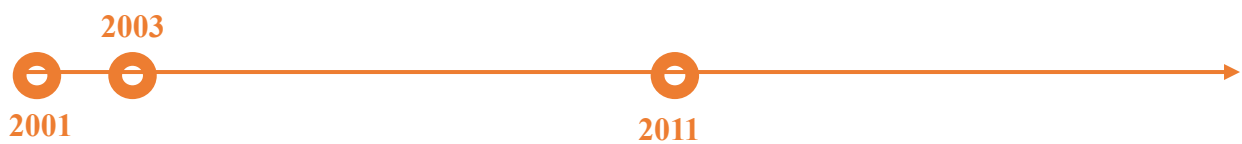
Murgänge verursachen Sachschaden in der Gemeinde Pians, entweder weil der Durchlass unter der alten Bundesstraße (B171) verstopft ist oder weil der Bach über den Ufer tritt, da er nicht schnell genug Wasser abtransportieren kann (HÜBL et al. 2003). Dadurch kommt es zu Überschwemmungen in den am Ufer gelegenen Häusern. Die baulichen Schutzmaßnahmen reichen oft nicht aus, um dies zu verhindern oder können nur teilweise Schutz bieten. Die aus der Kartierung des Einzugsgebiets und der Untersuchung historischer Ereignisse gewonnenen Einsichten lassen sich in einem abstrahierten Gerinnesystem abbilden – diese vereinfachte Darstellung gibt nützliche Anhaltspunkte im Rahmen der Installation eines Monitoringsystems (ebd.).

Die Standortwahl für die Errichtung der Messstationen im Jahr 2001 zur Erfassung des Niederschlags, des Abflusses sowie zur Dokumentation und Analyse der Ereignisse wurde nach den Kriterien Topographie, Einströmrichtung der Gewitter, kontinuierliche Energieversorgung, stabile Sohle, leichte Erreichbarkeit für Wartung und Kontrolle sowie Schutz vor Lawinen, Muren und Steinschlag getroffen (HÜBL et al. 2003). Vorgegangen wurde nach dem Prinzip, dass für eine effektive Vorwarnzeit, die Abflussmessung weit oben im Einzugsgebiet stattfinden sollte. Insgesamt gibt es fünf Messstationen für die Vorwarnung, Warnung, Dokumentation und Datensammlung, die der Reihenfolge entsprechend beschrieben sind (siehe Anhang A3):

- 1) Die Klimastation auf der Dawinalpe für die Gewinnung von Daten über Ereignisniederschläge mit Messgeräten wie Niederschlagswaage, Temperatur-, Luftfeuchte- und Strahlungsmessgerät sowie Ultraschall zur Erfassung der Schneehöhe.
- 2) Die Windmess/Relaistation auf dem Dawinkopf zur Untersuchung der Bewegungsrichtung von Gewitterfronten mittels Propeller-Windmessgerät.
- 3) Die Alarmstation in Grins, ausgestattet mit zwei Ultraschallsensoren und einem Geophon, zur Erfassung mehrerer geophysikalischer Parameter wie Fließtiefe, Erdschwingungen, Reinwasserabfluss und Fließgeschwindigkeit.
- 4) Die Station in Pians für die Dokumentation und Analyse von Ereignissen mittels Videokameras.
- 5) Die Masterstations Pians zur zentralen Datenspeicherung. (ebd.; siehe auch HÜRLIMANN et al. 2019)

Die Daten können täglich über Modem von spezialisierten Instituten abgefragt werden. Überschreiten die Messungen einen definierten Grenzwert, erfolgt eine Benachrichtigung per SMS oder E-Mail, was jedoch primär der Datenanalyse und Beobachtung dient (SCHIMMEL 2024). Im Alarmfall ermöglicht die digitale Videoaufzeichnung eine sofortige visuelle Einschätzung

der Situation. Die Analyse zwischen den Stationen Grins und Pians erlaubt eine Rückrechnung der Fließgeschwindigkeit eines Murgangs, was für die Abschätzung der Reaktionszeit bei Warnungen essentiell ist (ebd.). Die Anlagekosten beruhen sich auf ungefähr 160.000 Euro. Die Betriebs- und Wartungskosten sind ungefähr 1.000 Euro pro Jahr in Abhängigkeit von den entstandenen Anlageschäden. Die EU finanziert das Projekt im Rahmen des „Interreg IIIB“ zu 50 Prozent, die Republik Österreich zu 33 Prozent, das Land Tirol zu zehn Prozent, die Gemeinden Grins und Pians jeweils zu 2,5 Prozent sowie die Landesstraßenverwaltung zu zwei Prozent (WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG 2008).



Im Rahmen der Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF 2011) führten die ÖBB in Kooperation mit dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie als Auftraggeber eine Untersuchung durch, um das Potential adäquater Warnsysteme im Bereich der Naturgefahren für die temporäre Sicherung von gefährdeten Bahnstrecken zu evaluieren (HÜBL et al. 2014). Das Forschungsprojekt „Naturgefahren Radar“, durchgeführt vom IAN in Zusammenarbeit mit der H&S Hochfrequenztechnik GmbH, zielte darauf ab, ein fortschrittliches Mess- und Frühwarnsystem als Prototyp zu entwickeln (ebd.). Neben den etablierten Sensortechnologien, seismischen Sensoren und Infraschallsensoren wurde ein Hochfrequenz-Puls-Doppler-Radar im Einzugsgebiet implementiert. Dieses Instrument erlaubt die Messung der Oberflächengeschwindigkeit von Murenströmen in verschiedenen Entfernungstoren (HÜBL et al. 2017; siehe auch KOSCHUCH o.J.). In Kombination mit einem installierten 2D-Laserscanner bietet diese Ausrüstung die Fähigkeit, die Abflussmenge mit einer außerordentlich hohen Präzision und zeitlichen Auflösung zu approximieren (ebd.). Durch Innovation sollen bereits geringfügige Bewegungen im Gebiet zuverlässig detektiert werden. Bei Überschreitung definierter Schwellenwerte wird ein Alarm ausgelöst, der sowohl vor Ort (durch Warnleuchten oder Signalton) als auch über Mobilfunktechnik (GSM/UMTS/WLAN) an relevante Empfänger wie Streckendienstleiter*innen oder Warnzentralen weitergeleitet werden kann. Die erstmalige Installation des Radarsystems in Lattenbach fand am 26. Juni 2012 statt (Koordinaten: 10°30'38" O; 47°08'32" N) (ebd.) und ist heute noch in Betrieb (KOSCHUCH 2024).

Für die Installation des Systems war die Errichtung eines Mastes mit einer Höhe von sechs Metern und einem Durchmesser von 20 Zentimetern erforderlich, der direkt an der Brücke angebracht werden konnte (HÜBL et al. 2014). Zudem wurde ein Anschluss an das 240-Volt-

Stromnetz vorausgesetzt. Die spezifizierte Höhe des Mastes resultierte aus der Notwendigkeit, das Radarsystem oberhalb des Niveaus des vorbeifließenden Verkehrs zu installieren, bedingt durch die Positionierung des Stromanschlusses flussabwärts (ebd.). Die kontinuierliche Überwachung der Systemfunktionalität erfolgt über eine Internetverbindung. Dies ermöglicht eine Fernwartung, bei der sämtliche Systemparameter angepasst werden können. Zudem wird ein Systemausfall unmittelbar identifiziert. Ferner bietet die Fernwartung die Möglichkeit, das System für einen ausgedehnten Zeitraum in den Ruhemodus zu versetzen und es bei Bedarf erneut zu aktivieren. Nach der Reaktivierung kann das System umfassend auf seine Funktionsfähigkeit überprüft werden (ebd.).

Erfahrungen, Probleme und Herausforderungen

Herausforderungen und Probleme gab es zunächst bei der Selektion adäquater Messinstrumente, die nicht ausschließlich durch die Diversität der zu erfassenden Prozesse bedingt ist, sondern auch durch die variablen Umweltbedingungen sowie die Anforderung einer hohen zeitlichen Auflösung kompliziert wird (HÜBL et al. 2003). Im Beobachtungszeitraum zwischen Mitte Januar und Ende Februar 2003 wurden ungewöhnlich hohe Messwerte registriert, die als unrealistisch eingestuft werden mussten. Zusätzlich traten in dieser Phase vermehrt Messausfälle auf, was die Datenintegrität in Frage stellte. Die Instandhaltung und Überwachung der Messstationen erwiesen sich während des Winterhalbjahres als besonders herausfordernd (ebd.).

An der Station Grins wurden signifikante Diskrepanzen in den Pegelaufzeichnungen zwischen der oberen und unteren Messsektion über den gesamten Halbjahreszeitraum festgestellt (HÜBL et al. 2003). Diese Unterschiede lassen sich einerseits durch die divergierende Positionierung der Ultraschallsensoren – einmal im natürlichen Flussbett und einmal über der Abflusssektion – sowie andererseits durch den variierenden Flussverlauf bei niedrigen Wasserständen erklären. Des Weiteren zeigte sich im Frühjahr eine deutliche Korrelation zwischen der Geophonaufzeichnung und der Batteriespannung, was auf Energieversorgungsschwierigkeiten während der Wintermonate mit reduzierter Sonneneinstrahlung hindeutet und somit auch die Messausfälle erklären könnte (ebd.). Die Alarmierungsfunktion der Station Grins führte am 24. September 2003 zu einem Fehlalarm, als der Ultraschallpegel oberhalb des definierten Schwellenwerts von 100 cm verblieb. Eine sofortige Überprüfung mittels Videoüberwachung von der Station Pians aus ergab, dass es sich um einen Fehlalarm handelte. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Alarmierungen nur dann auszulösen, wenn Grenzwerte an beiden Messpunkten überschritten

werden. Die genauen Gründe für die anhaltende Fehlaufzeichnung des Ultraschallpegels bleiben unklar (ebd.). An der Station Pians wurde mehrfach ein konstanter Ultraschallmesswert von 199 cm erfasst, was auf eine Blockade des Messbereichs durch Baumstämme zurückgeführt werden kann (ebd.).

Seit der Implementierung der Hochfrequenzradartechnik konnten über einen Zeitraum von mehr als sechs Jahren kontinuierlich Daten gesammelt werden (KOSCHUCH o.J.). Das Radar ist strategisch nahe dem Bachlauf positioniert und überwacht eine spezifische Strecke von ungefähr 180 Metern mittels zehn Entfernungstoren, wobei jedes Tor eine Reichweite von etwa 15 Metern abdeckt. Diese Konfiguration ermöglicht es dem System, simultan zehn Spektren alle 0,33 Sekunden zu erfassen (ebd.). In der Theorie hat das Dopplerradar das Potential, Objekte über eine Distanz von bis zu zwei Kilometern mit vergleichbarer Präzision zu beobachten, wobei es bis zu 128 Entfernungstore nutzen könnte. Im Beobachtungszeitraum wurden verschiedene Ereignisse registriert (ebd.): ein kleineres Murenereignis im Jahr 2012, zwei Murenereignisse und ein Schlammrutsch im Jahr 2015, ein umfangreiches Ereignis mit mehreren Wellen im Jahr 2016, zwei signifikante Ereignisse im Jahr 2017 und eine Schneelawine im Jahr 2018. Alle genannten Ereignisse führten zur erfolgreichen Auslösung des integrierten Alarmsystems der ÖBB. Im Jahr 2017 erfolgte die Installation einer zusätzlichen Antenne zur Detektion starker Regenfälle im Einzugsgebiet. Die Funktionsfähigkeit aller ausgelösten Alarme wurde mithilfe verschiedener in dem Einzugsgebiet installierter Messgeräte verifiziert (ebd.).

Im Rahmen einer Studie zur Installation des AMM-Systems wurden Murenereignisse methodisch in „Stufe 1“ für kleinere Sedimenttransportprozesse, „Stufe 2“ für vollentwickelte Muren sowie in „nicht klassifizierbare Ereignisse“ aufgrund des fehlenden Datenbestands, eingeteilt (SCHIMMEL et al. 2018). Lattenbach war eines der Forschungsfelder, nebst Dristenau, Farstrinne, Schüsserbach, Gatria, Illgraben und Marderello (ebd.; siehe auch Kapitel 5.4). Von 2013 bis 2016 wurde die Station Lattenbach mit dem Chaparral-Modell 24-Infraschallsensor und dem SM-4-Geophon sowie dem SG-5-Geophon für Testzwecke ausgestattet (ebd.). Beispielsweise wurden im Jahr 2013 vier Fehlalarme registriert, was auf ein nicht korrekt arbeitendes Geophon zurückzuführen ist (HÜBL et al. 2016). Die Studie illustriert signifikante Unterschiede zwischen den Untersuchungsstandorten in der Zeit, in welcher eine Detektion ausgelöst wird, bevor die Murfront den Sensorstandort passiert (SCHIMMEL 2024). Speziell

zeichnet sich Marderello durch die längsten durchschnittlichen Zeiten von annähernd zehn Minuten (auf Stufe 1) aus, im Gegensatz zu Lattenbach für Ereignisse der „Stufe 1“ mit 17 Sekunden durchschnittliche Zeit und für diejenigen der „Stufe 2“ eine Sekunde (SCHIMMEL et al. 2018). Derzeit ist das System am Lattenbach aufgrund einer Wildbach-Baustelle kurzfristig abgebaut worden (SCHIMMEL 2024).

7.2 Suggadinbach/Mäßtobel

Fallbeispiel 2

Einzugsgebiet

Größe: Die Gesamtfläche des Einzugsgebiets beläuft sich auf circa 0,42 km².

Lage: Das Einzugsgebiet des Kontaktpunktes Suggadinbach/Mäßtobel liegt im Bezirk Bludenz in Vorarlberg (siehe Abbildung 10). Das Mäßtobel fließt auf einer Höhe von 1.070 Metern rechtsseitig in den Hauptbach Suggadinbach ein.



Abbildung 10 - Monitoringstelle am Mäßtobel.
(OSTERMANN & AMABILE 2019: 20)

Betroffene Gemeinden: St. Gallenkirch; indirekt bei Bachaufstau: Galgenul.

Geologie: „Geologisch gesehen befindet sich das Gemeindegebiet von St. Gallenkirch im Kristallin der Silvrettadecke, welches zur oberostalpinen Decke zählt.“ (KREISLER et al. 2014: 143). Die plastische Deformation der weichen Glimmerschieferlage resultiert aus der Belastung durch die darüber liegenden, massiven Amphibolitschichten, die gegen den freien Taleinschnitt gedrückt werden. Der darüber befindliche Gesteinskomplex zeigt eine Bruchreaktion entlang tektonisch bedingter Störungslinien, was zu dessen Zerlegung führt. Die Prozessarten der Massenbewegung sind Kippen und Fließen (inklusive Kriechen), ausgelöst durch Erosion, Niederschlag sowie Schnee- und Permafrostschmelze. Diese geologischen Veränderungen bergen das Risiko einer Verklausung des Suggadinbachs durch herabfallende Fels- und Murmassen mit einem Volumen von 800.000 m³, was letztendlich zu einem Dammdurchbruch mit einer anschließenden Hochwasserwelle führen könnte, die direkt auf die Ortschaft St. Gallenkirch trifft.

Temperatur und Niederschlag: „Der niederschlagsärmste Monat ist mit 107 mm der Februar. 195 mm fallen dabei durchschnittlich im Juni. Der Monat ist damit der niederschlagsreichste Monat des Jahres. [...] Der im Jahresverlauf wärmste Monat ist mit 10.3 °C im Mittel der Juli. Mit im Durchschnitt -9.9 °C ist der Januar der kälteste Monat des ganzen Jahres.“ (CLIMATE DATA o.J.).

Ereignisse: Im Jahr 1999 wurde eine beschleunigte Felsgleitung im Mäßtobel festgestellt, welche durch ergiebige Niederschläge zu Pfingsten desselben Jahres ausgelöst wurde. Im niederschlagsarmen Sommer 2003 verlangsamten sich die Bewegungen der Gleitmasse zunächst, bevor sie im Frühjahr desselben Jahres wieder an Beschleunigung gewannen. Die Verlängerung der Messstrecken in diesem Jahr um etwa zehn Zentimeter in Kombination mit Geländebeobachtungen bestätigte die anhaltende Bewegung der Felsgleitmasse aus dem oberen Startbereich talwärts. Gefährdet sind die Gargellener Straße L192, die Brücke der Gemeindestraße nach Neuberg, das Maisäßgebäude von Planetsch und die Wasserfassung der Vorarlberger Illwerke. Direkt und indirekt können somit wesentliche Infrastrukturen und Teile der Gemeinde zerstört werden. (JÄGER & MOSER 2008; siehe auch JÄGER & SCHMIDT 2006; siehe auch OSTERMANN & AMABILE 2019; siehe auch WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG 2008)

Entwicklung



Im günstigsten Fall würde die Gleitmasse blockweise in das Mäßtobel eingleiten und dabei größere Steinlawinen und Muren verursachen, die zuerst die Flachstrecke des Tobels auffüllen und dann in den Suggadinbach vordringen würden (FRANDL et al. 2014). Sollte die Masse jedoch auf einmal abrutschen, könnte die Straße L192 auf einer Strecke von mehreren hundert Metern mit bis zu 30 Metern Höhe bedeckt werden (ebd.). Im Bereich des Hangabbruchs wurden Überwachungseinrichtungen installiert, die dazu dienen sollen, sowohl langfristige Veränderungen in der Stabilitätssituation als auch den Durchgang von Schutt und Gestein durch das Tal zu erfassen (WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG 2008). Zwischen Juni und November 2000 wurden an sieben Messpunkten Holzlatten-Spione und Farbmarkierungen eingesetzt. Im Jahr 2001 erfolgte die Einrichtung von drei Messabschnitten, einem Inklinometer und zwei PE-3C-Geophone entlang des Abbruchgebiets (ebd.). Die Energieversorgung läuft mittels Solarstrom und Akku (ebd.). Die erfassten Daten aus dem Abbruchgebiet werden über das GSM-Netz übertragen und von der Firma GEOGNOS Bertle ZT GmbH ausgewertet, um eine frühzeitige Warnung bei sich verschlechternder Stabilität zu ermöglichen. Zur Verbesserung der Überwachung des Anrissgebiets installierte die WLW im Sommer 2003 ein zusätzliches Messsystem, bestehend aus vier Messabschnitten und einem weiteren Inklinometer, das von der

Firma Sommer Messsystemtechnik GmbH & CoKG geliefert wurde (ebd.). Die Geophone entlang der Sturzbahn sind mit der Ampelanlage der L192 verbunden (siehe Anhang A4). Bei Auslösung der Geophone schaltet die Ampel auf Rot, wodurch der Verkehr von und nach Gargellen nur noch über die Umfahrungsstraße geleitet wird. Die Kosten für die Überwachung und Auswertung der Messstation sowie für die Wartung und gegebenenfalls den Umbau der Messstation durch die Firma Sommer werden von der Landesstraßenverwaltung getragen, sofern keine laufenden Projekte von der WLW oder der EU finanziert werden (ebd.).

Aufgrund der Dammdurchbruchgefahr und dessen weiterer Folgen wurde 2005, nach Einlangen eines Antrags von St. Gallenkirch bezüglich der Sicherheitsfrage der Gemeinde, ein Simulationsprojekt ins Leben gerufen (JÄGER & MOSER 2008). Dieses Vorhaben zielt darauf ab, das Risiko sowie die potenziellen Konsequenzen der Flutwelle für das Siedlungsgebiet zu evaluieren. Weiterhin sind in diesem Rahmen Strategien und Handlungen für ein effektives Risikomanagement vorgesehen. Moderne Laser-Scan-Daten wurden zur Modellierung des Geländes verwendet, ergänzt durch eine detaillierte geologische Untersuchung durch GEOGNOS Bertle ZT GmbH (ebd.). Expertengruppen legten basierend auf dieser neuen Ausgangslage für das maßgebliche Ereignis ein Volumen von ungefähr 150.000 m³ an Murmasse fest, die in den Vorfluter Suggadinbach einfließen könnten. Die hydrologische Analyse erfolgte mittels des Modells HEC-HMS, wobei die Überprüfung der Plausibilität und die Kalibrierung des Modells anhand dokumentierter Hochwassermarken und Niederschlagsdaten des Hochwasserereignisses von 2005 möglich waren (ebd.; siehe auch JÄGER & SCHMIDT 2006). Das Hochwasser führte zur Zerstörung der Straßeninfrastruktur, einschließlich der damit verbundenen Kabelnetze, Entwässerungssysteme, Straßenränder sowie Sicherungsmaßnahmen für Böschungen (VORARLBERGER LANDESREGIERUNG o.J.). Teilweise verursachten Muren Absenkungen der Fahrbahnflächen und machten diese für mehrere Tage bis Wochen unbefahrbar. Der Gesamtschaden am Straßennetz betrug 34,5 Mio. Euro. Die Gargellener Straße L192 hatte davon einen Schadensanteil in Höhe von 10,3 Mio. Euro (ebd.). Die Untersuchung des Einflusses eines Dammbrochs auf die Überflutung von Siedlungsgebieten basierte auf der hydraulischen Berechnung und Analyse verschiedener Szenarien (JÄGER & SCHMIDT 2006). Die Berechnungen fokussieren sich auf den Abschnitt des Wasserlaufs, wo Mäbstobel und Suggadinbach zusammenfließen – in diesem Bereich prognostizieren Expert*innen das Auftreten von Verkläusungen (ebd.).



Im Rahmen des transnationalen EU-Projekts SedAlp (Sedimentmanagement in alpinen Einzugsgebieten) hat das IAN in Zusammenarbeit mit der WLV eine Anlage zur Messung des Geschiebetransports am Suggadinbach im Juni 2013 installiert (CHIARI et al. 2016). Das Messsystem setzt sich aus 13 Schweizer-Typ-Geophonsensoren und drei modifizierten japanischen Rohrhydrophonen zusammen, die unter Stahlplatten montiert sind, wodurch die Stärken beider Systeme genutzt werden können (ebd.). Das Prinzip eines Rohrhydrophons basiert auf der Schallwelle, die erzeugt wird, wenn eine Partikel auf das Rohr trifft (MIZUYAMA et al. 2010). Die akustische Reaktion wird von einem Mikrofon im offenen Bereich des Rohrs erfasst (ebd.). Die Stromversorgung erfolgt über ein Back-USB Pro 1500VA (OSTERMANN & AMABILE 2019).

Beide Systeme sind so angeordnet, dass sie hintereinander in der Fließrichtung des Wassers liegen, was ihren direkten Vergleich ermöglicht. Die Funktionsweise der Anlage wurde durch Feldversuche überprüft: Dabei wurde Sediment mit einem Kran in einem Betoncontainer zugeführt und eine spezielle Rinne sorgte für einen geregelten Fluss und Sedimenttransport über die Messanlage. Getestet wurden vier verschiedene Korngrößen bis zu 64 mm und eine Mischung aus mehreren Kategorien mit insgesamt vier Tonnen Material (CHIARI et al. 2016). Um den Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Signalform und die Auswirkungen benachbarter Sensoren zu analysieren, wurden Frequenzanalysen für die verschiedenen Kornklassen durchgeführt. Die Standardmethode zur Auswertung und Speicherung der Daten im Minutentakt offenbarte, dass die Rohrhydrophone feinere Korngrößen erfassen können als die Geophonsensoren (ebd.). Zur Dokumentation potenzieller morphologischer Veränderungen bei größeren Murreignissen wurde ein Referenzgeländemodell mit Hilfe von unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) erstellt (siehe Anhang A4) (ebd.). Gefördert wurde das Projekt bis 2015 (KREISLER et al. 2014).

Erfahrungen, Probleme und Herausforderungen

Aus dem Simulationsmodell resultiert, dass die identifizierten Risikobereiche, gekennzeichnet als „rote und gelbe Gefahrenzonen“, im Großen und Ganzen mit dem bereits im Jahr 2003 erstellten Gefahrenzonenplan übereinstimmen (JÄGER & MOSER 2008). Das Schutzkonzept

der Gemeinde St. Gallenkirch umfasst auch ein Frühwarnsystem, welches ermöglicht, die Bevölkerung in den betroffenen Wohngebieten zu warnen (ebd.). Die Studie zeigt, dass die Vorwarnzeit zehn bis 15 Minuten beträgt, basierend auf den in der Fachliteratur beschriebenen Fließgeschwindigkeiten von Muren mit hohem Sedimenttransport. Dies ermöglicht es, gemäß dem vorhandenen Katastrophenplan, die direkt betroffenen Bewohner*innen rechtzeitig zu informieren und zu evakuieren (ebd.).

Eine der Herausforderungen besteht darin, dass während des Winters teilweise Eisablagerungen an den Seilen, die als Messstrecken dienen, im obersten Einzugsgebiet auftreten (WILDBACH-UND LAWINENVERBAUUNG 2008). Diese Eisbildung kann die Genauigkeit der Messungen beeinträchtigen und zu verzerrten Ergebnissen führen. Ein weiteres Problem ist, dass der Mast, der als Treffpunkt für die drei Seile dient, bergwärts wandert. Diese Bewegung des Masts kann zu einer ungenauen Ausrichtung der Messvorrichtungen führen, was wiederum zu negativen und unverlässlichen Messdaten führt (ebd.). Insgesamt stellen diese Herausforderungen eine erhebliche Einschränkung für die Datenqualität über Murgänge am Mäbtobel dar. Im Rahmen der Betrachtung der Instandhaltung und Wartung dieser technischen Anlagen ist die finanzielle Belastung ein wesentliches Problem (FRANDL et al. 2014). So wurde z.B. im Bericht aus der 30. Gemeindevertretungssitzung von St. Gallenkirch verzeichnet, dass die laufenden Betriebskosten der Anlagen von der Vorarlberger Illwerke AG und dem Land Vorarlberg übernommen werden (JUEN 2002). Ebenso wurde über die Bildung einer Naturgefahrenkommission debattiert (ebd.). Das Hochwasser in St. Gallenkirch im Jahr 2005 ist ein Beispiel für die Verwundbarkeit technischer Systeme gegenüber Naturkatastrophen gewesen. Weiterhin stellt die Unsicherheit bezüglich des Weiterbetriebs der Messanlagen nach Auslaufen von diversen Projekten ein Risiko in Bezug auf Funktionstüchtigkeit und finanzielle Unterstützung dar (FRANDL et al. 2014). Dies ist für die Langlebigkeit sowie Effektivität der Frühwarn- und Monitoringsysteme von entscheidender Bedeutung und erfordert einen multidisziplinären Ansatz, der technische, finanzielle und organisatorische Aspekte umfasst.

7.3 Erkenntnisse aus den Fallbeispielen

Die Verwendung von Geophonsensoren für die Datenerfassung wird in beiden Fällen hervorgehoben. In den Texten werden die Herausforderungen bei der Messgenauigkeit, z.B. aufgrund von Umweltbedingungen wie Eisablagerungen oder die Wanderung von Messpunkten, als kritische Punkte in der Datenerhebung identifiziert. Die Analyse der Fallbeispiele unterstreicht die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Verbesserung der Mess- und Frühwarnsysteme, um die Fehlerdichte zu reduzieren und somit die Zuverlässigkeit der Daten zu erhöhen. Die Anpassung

und Kalibrierung von Messsystemen an variable lokale Bedingungen ist ein kritischer Faktor für die Genauigkeit der Datenerfassung. Für die Entwicklung nachhaltiger Überwachungs- und Frühwarnsysteme ist die multidisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Ingenieurwesen, Geowissenschaften und Technologieentwicklung essentiell. Die finanzielle und organisatorische Unterstützung von Monitoringsystemen stellt eine anhaltende Herausforderung dar, die in zukünftigen Forschungsarbeiten adressiert werden muss. Gemeindemitglieder stellen die Frage nach finanziellen Mitteln für die Instandhaltung der Systeme in den Brennpunkt. Die EU fördert teilweise Kooperationsprojekte wie „Interreg“. *Fallbeispiel 1* zeigt, dass Frühwarnungen bis dato primär der Datenüberprüfung dienen, insbesondere wenn es sich um Forschungsinitiativen im Gelände handelt. Wie aus *Fallbeispiel 2* hervorgeht, sind Gemeinden Auftragsgeberinnen diverser Projekte mit dem Ziel einer Gefahrenzonenbewertung mittels Simulationen und Geländeaufnahmen, um dementsprechend potenzielle Risiken durch Naturgefahren wie Murgänge nicht außer Acht zu lassen – diese können Schadenssummen in Höhe von mehreren Millionen Euro verursachen. Nebst Gemeinden können es auch Konzerne wie die ÖBB im *Fallbeispiel 1* sein. Als Maßnahme für gefährdete Straßen bei erhöhter Muraktivität wird mittels Ampelschaltung in den Einzugsgebieten operiert. Die Frühwarnmitteilungen, z.B. via SMS, gehen nicht direkt an die Bewohner*innen der betroffenen Gemeinden, sondern u.a. an Projektkoordinator*innen, Mitarbeiter*innen der Straßenverwaltung und Einsatzkräfte.

7.4 Endnutzerzentrierte Frühwarnsysteme

Ein Naturphänomen wird erst dann zur Naturkatastrophe, wenn es aus einem nicht wertfreien Blickwinkel betrachtet wird. Das Portal „Platform for the Promotion of Early Warning der United Nations International Strategy for Disaster Reduction“ erörtert dazu folgendes: *„A disaster occurs only if a community or population is exposed to the natural hazard and cannot cope with its effects.“* (ISDR o.J.).

Diese Aussage greift auf den elementaren Bestandteil von Frühwarnsystemen zurück – Menschen, die ein schadenbringendes Naturereignis deswegen als eine Naturgefahr bezeichnen, da sich etwas Neutrales in ihrem Umfeld und aus ihrem Erleben zu etwas Negativem wandelt (RUDOLF-MIKLAU 2018). Insofern erlaubt sich diese Arbeit auch den Faktor Mensch nebst natürlichen Erklärungen von Zuständen in den Fokus zu nehmen, denn a) der Mensch trägt durch seine Aktivitäten zur Auslösung von Naturkatastrophen bei, b) der Mensch leidet unter den und aufgrund der provozierten Umstände, c) der Mensch versucht sich vor derartigen Auswirkungen zu schützen und d) der Mensch ist ein primärer Nutzer derartiger Systeme.

Im Kontext der Notfallreaktion und -bewältigung lässt sich eine Differenzierung zwischen zwei primären Nutzergruppen feststellen: den Backend- und den Frontend-Nutzern (CORTES et al. 2012). Während Frontend-Nutzer direkt im Einsatzgebiet agierende Akteure umfassen, die in realen Notfallsituationen intervenieren, repräsentieren Backend-Nutzer jene Operatoren, die aus den Leitstellen heraus agieren, indem sie strategische Ziele formulieren sowie Anweisungen und relevante Informationen an die Frontend-Operatoren weiterleiten (ebd.). Vor dem Hintergrund hydrometeorologischer Bedrohungen manifestieren sich Katastrophen nicht ausschließlich in Situationen, in denen entweder die Vorhersagbarkeit der Gefahr keine präventiven Maßnahmen ermöglicht oder die individuelle Kapazität sowie die Bereitschaft zur Vorbereitung und Reaktion auf Notfälle limitiert sind. Vielmehr trägt auch das Versagen der Kommunikationsinfrastrukturen zwischen den Einsatzkräften oder ein Defizit an koordinativer Abstimmung wesentlich zum Ausmaß von Katastrophen bei (ebd.) – in solchen Szenarien ist oftmals eine effektive Kommunikation zwischen den Erstreaktionsteams bzw. Koordinatoren und ihren Leitzentralen nicht möglich, da mobile Kommunikationsmittel, Funkverbindungen und Internetzugänge am Einsatzort häufig gestört sind oder vollständig ausfallen (ebd.).

Zum Aspekt Nutzeroptimierung ist zu sagen, dass nebst herkömmlichen LEWS auch an interdisziplinären Verbundprojekten wie ILEWS geforscht wurde. Während diese die grundlegenden Elemente traditioneller LEWS beinhalten, integrieren sie ganzheitliche Aspekte unter Kombination verschiedener Disziplinen: *„Es darf im Sinne einer Warnampel nicht mit einer >roten Lampe< enden, sondern muss, dem Leitgedanken >vom Sensor bis zur Handlungsempfehlung< folgend, die vom Prozess betroffenen Menschen adäquat einbeziehen.“* (BELL et al. 2010a: 9). In der historischen Betrachtung zeigt sich, dass geowissenschaftliche Experten häufig Systeme konzipierten und implementierten, ohne dabei die lokalen Akteure und Betroffenen in angemessenem Umfang zu involvieren (BELL et al. 2010b). Das zuvor angeführte Zitat illustriert, dass an dieser Stelle oftmals eine Diskrepanz vorliegt, da man sich vorwiegend auf technische Formalitäten konzentriert. Diese könnte durch die Einbeziehung sozial- und gesellschaftswissenschaftlicher Ansätze überbrückt werden (ebd.). Es geht nicht nur darum, ein Problem oder eine Gefahr zu erkennen und anzuzeigen, sondern auch konkrete Handlungsempfehlungen zu geben. Die Analyse der Übertragungsfähigkeit des ILEWS-Frühwarnsystems offenbart, dass eine Vielzahl der Aspekte dieses integrativen Systems auf diverse Regionen anwendbar ist. Die primäre Herausforderung liegt jedoch nicht in der Übertragung einzelner Komponenten – eine Aufgabe, die in vielen Fällen realisierbar erscheint. Vielmehr besteht die Schwierigkeit darin,

diese Komponenten so zu koordinieren und zu integrieren, dass sie ein kohärentes und effektives Gesamtsystem bilden (ebd.).

Im Kontext der diversifizierten Anforderungen, die an Frühwarn- und Monitoringdienste gestellt werden, erweist sich eine Standardisierung als nachteilig gegenüber einem flexiblen Einsatz variabler Elemente, wie auch das ILEWS-Modell zeigt (MAYER et al. 2010b). In der Publikation von u.a. Villagran de León werden vier zentrale Elemente eines endnutzerzentrierten Ansatzes hervorgehoben. Diese sind Risikowissen, technische Überwachung und Warnungsdienst, Verbreitung einer verständlichen Warnung an die Gefährdeten und Reaktionsfähigkeit. Zentralisierte Systeme, die von nationalen Behörden betrieben werden, unterscheiden sich von dezentralisierten Systemen, welche von regionalen und/oder lokalen Gemeinschaften verwaltet werden. Letztere haben eine flexiblere Anpassungsfähigkeit auf lokale Bedürfnisse (VILLAGRAN DE LEÓN et al. 2006). Diese Schlüsselemente decken sich auch mit dem Ansatz von u.a. Matjaž zu menschenzentrierten Frühwarnsystemen: „*There are 5 key elements of the human-centred EWS: a) Knowledge of the debris-flow risk; b) Monitoring, analysis, and forecasting of debris-flow hazards; c) Operational centres; d) Communication or dissemination of alerts and warnings; e) Local capabilities to respond to the warnings received.*” (MATJAŽ et al. 2014: 24)

Angemessene Maßnahmen zur Risikominderung basieren somit auf dem Verständnis der Risiken, der kontinuierlichen Überwachung und Bewertung der Gefahrensituation, der effektiven Kommunikation von Warnungen an die betroffene Bevölkerung und der Stärkung der lokalen Reaktionsfähigkeit. Wichtig sind hierbei auch die „operationellen Zentren“ als ein wesentlicher Antrieb für Notfallmanagement-Operationen. Die von der Europäischen Gemeinschaft finanzierte Forschungsinitiative über Methoden und Techniken für die Notfallreaktion im Falle von Murengefahr zeigt, dass die Notwendigkeit eines nutzerzentrierten Designs mittels Suche nach Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Systeme geklärt werden kann (CORTES et al. 2012).

8. Identifikation von Problemfeldern und Verbesserungspotenzialen

Durch das Aufdecken und Adressieren von Schwachstellen können Frühwarn- und Messdienste zukünftig präziser und verlässlicher gemacht werden sowohl in der Aufzeichnung als auch Erkennung und Warnung vor bevorstehenden Naturgefahren. Das Kapitel liefert eine Betrachtung der gegenwärtigen Schwierigkeiten und Bereiche mit Optimierungsbedarf.

Trotz des wachsenden Engagements in der Weiterentwicklung von Überwachungssystemen, die auf preiswerten Sensornetzwerken beruhen, gibt es bisher nur eine geringe Anzahl von Beispielen, in denen Frühwarnsysteme von Muren dauerhaft eingesetzt und von kommunalen Einrichtungen angenommen wurden (COVIELLO 2023). Die Implementierung nicht-baulicher Minderungsstrategien kann signifikant zur Reduktion der Schadenspotenziale von Murgängen beitragen, während umfangreiche Langzeitdaten aus Gebieten mit regelmäßigen Murgangereignissen (mindestens ein- bis zweimal pro Jahr) für die Optimierung von Gefahrenkarten, die Überprüfung von Murgangmodellierungen und die Entwicklung effektiver Frühwarnsysteme essentiell sind (ebd.).

In folgenden Punkten besteht noch Verbesserungsbedarf:

- **Gestaltung der Warnmeldung**

Frühwarnsysteme müssen auf Dauer flexibel genug sein, um auf Veränderungen der Gefahrensituation reagieren zu können. Im Kontext der Optimierung von Frühwarnsystemen ist es erforderlich eine graduelle Abstufung in der Verteilung der Warnmeldungen zu implementieren (SCHMIDT 2003). Das heißt, dass die Warnmeldungen nicht gleichförmig und einheitlich zu gestalten sind, sondern sie je nach Dringlichkeit, Schwere der Gefahr und Zielgruppe anzupassen und zu differenzieren sind. Dies könnte beispielsweise bedeuten, dass in Gebieten oder für Personen, die einem höheren Risiko ausgesetzt sind, dringlichere Warnungen ausgegeben werden, während in weniger gefährdeten Bereichen die Warnungen weniger dringend oder detailliert sein könnten (ebd.). Außerdem zählen für die Gestaltung von Warnungen vier wesentliche Prinzipien: hohe Glaubwürdigkeit der Warnbotschaft, Klarheit und Deutlichkeit der Formulierung, Verständlichkeit im Kontext der Zielgruppe und Inklusion klarer Handlungsanweisungen (MAYER et al. 2010a; siehe auch KUNZ-PLAPP 2008). Anzumerken ist, dass die Möglichkeit besteht, eine Warnung kundenwunschabhängig zu gestalten, wie es am Dawinbach der Fall war (KOSCHUCH 2024). Das betrifft auch die Festlegungen der Algorithmen, ab welchen erfassten Werten ein Frühwarnsystem Zielpersonen warnen soll (ebd.). Damit ein Frühwarnsystem das Spektrum an potenziellen Nutzer*innen erreichen kann und dementsprechend Flexibilität bieten kann, ist die laufende Einbindung von Nutzerfeedback in Projekte und die Schaffung von Schnittstellen förderlich (ARNHARDT et al. 2007).

▪ **Krisenkommunikation**

Eine effiziente Kommunikation bildet das Fundament für ein verbessertes Management von Naturgefahren. Angesichts der Herausforderungen eines sich verändernden Klimas erfordert die effektive Bewältigung dieser Bedrohungen innovative Lösungsansätze (STEELMAN & MCCAFFREY 2013). Eine fortlaufende und interaktive Kommunikationspraxis mit der Öffentlichkeit bezüglich neuer Managementstrategien und der Begründungen für deren Anwendung kann einen wesentlichen Beitrag zur Förderung von Verständnis und Akzeptanz gegenüber diesen Veränderungen leisten. Die Ergebnisse der Studie (ebd.) untermauern diese wissenschaftlichen Erkenntnisse im Bereich der Risiko- und Krisenkommunikation, welche die Bedeutung der Bereitstellung klarer und präziser Informationen, die lokale Gegebenheiten berücksichtigen, hervorheben. Dieser Ansatz kann dazu beitragen, die grundsätzliche Unsicherheit, die mit Naturgefahren einhergeht, zu minimieren und somit potenzielle Unzufriedenheit zu reduzieren (ebd.). Obgleich die Aufrechterhaltung einer solchen kontinuierlichen Kommunikation den Einsatz von Ressourcen voraussetzt, legen die Forschungsergebnisse nahe, dass diese Investitionen von entscheidender Bedeutung sein könnten, um sicherzustellen, dass die Erwartungen der Gemeinschaft in Einklang mit den zukünftigen Ausrichtungen des Krisenmanagements stehen (ebd.). Andere Studien heben vor allem den Aspekt der sozialen Medien in der Krisenkommunikation hervor (siehe HOUSTON et al. 2015; SPENCE et al. 2016). Zu den am häufigsten angewandten Kommunikationsmodellen zählen die hierarchischen Ansätze. Weitere Modelle wie deskriptive oder konstruktivistische sollten auch berücksichtigt werden (MAYER et al. 2010a).

▪ **Fehlalarmrate**

In den letzten Jahren zeigt die Erfahrung mit Frühwarn- und Monitoringanlagen, dass diese häufig anfällig auf Fehlsignale sind (RUDOLF-MIKLAU 2023; SCHELLANDER 2023). Mit zunehmender Präzision der Vorhersagemodelle verringert sich aufgrund der inhärenten Variabilität natürlicher Prozesse die Wahrscheinlichkeit, dass die Prognosen mit absoluter Genauigkeit realisiert werden (HEISTERKAMP et al. 2016). Weshalb Fehlalarme prinzipiell entstehen, lässt sich u.a. auf Aspekte der Modellkalibrierung, welche die lückenlose Erfassung relevanter Ereignisse nicht gewährleisten können, zurückführen (GEOSPHERE AUSTRIA o.J.). Die Festlegung der „richtigen“ Schwellenwerte ist in diesem Zusammenhang eine heikle Angelegenheit, denn: a) „Oft

kommt es zu Saisonbeginn auch zu einer Besprechung der beteiligten Institutionen und Landesabteilungen, bei denen beispielsweise über die Schwellenwerte diskutiert wird. Sind diese zu niedrig, wird zu oft gewarnt, sind sie zu hoch werden wichtige Ereignisse übersehen.“ (SCHELLANDER 2023), b) die adäquate Justierung der Schwellenwerte stellt eine interdisziplinäre Herausforderung dar, welche die Kooperation von Experten aus diversen Fachrichtungen erfordert, einschließlich Meteorologie, Hydrologie, Geologie sowie Vertretern verschiedener kommunaler Behörden und der Exekutive (ebd.) und c) es stellt sich die Frage, wo die Grenze der „richtigen“ Schwellenwerteeinstellung liegt, denn z.B. im Kontext der Hahntennjochstraße erweist sich eine strategische Überwarnung als zweckmäßig, um die Erfassung extremer Ereignisse unter allen Umständen sicherzustellen (ebd.). Ein Frühwarnsystem versagt, wenn es einerseits eine zu hohe Anzahl an Fehlalarmen aussendet und andererseits, wenn es ein Ereignis versäumt und dementsprechend nicht warnt (KOSCHUCH 2024). So hat zum Beispiel die langjährige Erfahrung mit Geophon und Infrasound gezeigt, dass diese aus physikalischen Gründen anfällig auf Fehlalarme sind. Es wurde in den letzten Jahren immer wieder versucht sie technisch weiterzuentwickeln, dennoch gibt es Fehlerquellen wie z.B. Hubschrauber (KOSCHUCH 2024). Eine Optimierung der Niederschlagsschwellenwerte ist durch den Einsatz kombinierter Instrumente zur Datenerfassung in den Ursprungsgebieten von Murgängen realisierbar (COVIELLO 2023). Des Weiteren lässt sich die hydrologische Antwort auf Niederschlagsereignisse im Initiationsbereich des Einzugsgebiets zur Verfeinerung der Warnfunktionen bestehender Niederschlagsschwellen heranziehen (ebd.).

▪ **Technische Ausbaufähigkeit**

Murenabgänge sind als messbare Prozesse schwer zu definieren und noch herausfordernder zu quantifizieren. Frontale Niederschlagsereignisse lassen sich mit höherer Genauigkeit prognostizieren als kurzfristige, kleinräumige konvektive Niederschläge, wie sie bei Gewittern auftreten. Letztere spielen jedoch eine entscheidende Rolle bei der Auslösung von Murenereignissen (SCHELLANDER 2023). Welche Rolle spielt dabei die Dauer der Vornwarnzeit? Die Präzision der Vorhersagen nimmt mit der Verkürzung des Prognosezeitraums zu. Vor 15 Jahren blickte man auf die technische Entwicklung von Frühwarnmodellen kritisch: *„Eine Warnung vor Naturgefahren mit extrem kurzer Vorwarnzeit (Muren, Rutschungen, Steinschlag) ist mit den derzeit verfügbaren technischen Mitteln unrealistisch.*“ (RUDOLF-MIKLAU 2009: 200). Das heißt, dass die Forschung noch nicht so weit war, Systeme zu konzipieren, die dementsprechend schnell

vor plötzlich eintretenden Ereignissen warnen konnten. Heute besteht in dieser Hinsicht zwar immer noch Luft nach oben, aber es gibt mehr Projekte in dieser Richtung wie Nowcasting-Methoden, wobei sogar deren Fehlermarge auf erhebliche Unsicherheiten hinweist (GHAEMI et al. 2021).

- **Geringe Akzeptanz reiner Modellierungen**

Modellbasierte Prognosen, die nicht durch zusätzliche empirische Daten aus Messungen und Beobachtungen gestützt werden, begegnen oftmals einer reduzierten Akzeptanz (HEISTERKAMP et al. 2016). Dies resultiert aus einer eingeschränkten Nachvollziehbarkeit und Glaubwürdigkeit der zugrunde liegenden Entscheidungsprozesse für Warnungen. Die Einbindung ergänzender Mess- und Beobachtungsdaten kann indessen die Akzeptanz und das Vertrauen in Warnsysteme signifikant verbessern, da sie eine umfassendere und transparentere Basis für die Entscheidungsfindung liefern (ebd.). Die Akzeptanz von Warnungen umfasst auch politische Dimensionen, welche maßgeblich durch das variierende Vertrauensniveau beeinflusst werden, das den potenziellen Aussteller*innen dieser Warnungen entgegengebracht wird. Dies führt zu wesentlichen Fragestellungen hinsichtlich der Autorität und der Verantwortlichkeiten jener Akteurgruppe, die als offizielle Warnende fungieren. Angesichts der signifikanten Verantwortung, die die Rolle der*s Warnenden mit sich bringt, ist eine rechtliche Absicherung imperativ, um die Integrität des Warnprozesses zu sichern und zugleich mögliche rechtliche Folgen für die ausstellenden Warnenden zu adressieren (ebd.).

- **Weitere Problemfelder**

Die Einrichtung und Wartung dieser Systeme ist mit hohen Kosten verbunden und erfordert u.a. erhebliche Bürokratie (BRAUNER et al. 2015). Ein hoher Stromverbrauch stellt insbesondere in abgelegenen oder schwer zugänglichen Gebieten, wo die Energieversorgung begrenzt oder nicht vorhanden ist, eine Herausforderung dar (HÜBL et al. 2014). Extreme Witterungsbedingungen erschweren die Identifikation eines zuverlässigen Positionierungspunktes. Ziel sollte es sein, die Genauigkeit der Warnungen zu verbessern, den Energieverbrauch zu minimieren, die Robustheit der Systeme gegenüber Umwelteinflüssen zu erhöhen und die Installations- und Wartungskosten zu reduzieren (ebd.). Eine wichtige Problematik stellt die Frage dar, inwiefern Frühwarn- und Messstationen auf Dauer effektiv sind oder sich als effektiver gegenüber anderen Vorkehrungen erweisen. Nicht allein die Investition in Prototypen und kurzfristige Projekte sollte

im Vordergrund stehen, sondern auch die nachhaltige Pflege und Aktualisierung des vorhandenen Schutzniveaus (PATEK 2008). Dies erfordert dementsprechend die laufende Berücksichtigung lokaler, natürlicher und sozialer Gegebenheiten sowie gegebenenfalls die Erstellung von Notfallkonzepten.

Somit besteht nicht nur auf rein technisch-wissenschaftlicher Ebene bei Frühwarn- und Monitoringsystemen Verbesserungsbedarf, sondern ebenso auf politischer, interdisziplinärer, grenzüberschreitender, rechtlicher und sozialer Ebene. Eine effektive Lösung für die beschriebenen Problemfelder erfordert einen mehrdimensionalen Ansatz. Wichtig ist, eine klare Verantwortungsstruktur zu etablieren, die festlegt, wer bei der Erkennung einer potenziellen Mure den Alarm auslöst (COVIELLO 2023). Dies beinhaltet die Definition von Protokollen, welche die Anzahl akzeptabler Fehlalarme, die erforderlichen Mindestvorlaufzeiten für Warnungen und die entsprechenden Maßnahmen und Kommunikationsstrategien für die verschiedenen Alarmstufen klar festlegen (ebd.). Bei der Festlegung des Schwellenwertes ist es essentiell, sowohl die Intensität als auch die Dauer des Signals in die Betrachtung einzubeziehen (SCHMIDT 2003).

9. Conclusio

Abschließend werden hier jene Ansätze reflektiert, welche durch die eingehende Untersuchung im Hinblick auf die Forschungsfragen und Hypothesen identifiziert wurden. Die eingangs formulierten Forschungsfragen adressieren die Heterogenität der Messverfahren sowie die determinierenden Faktoren, die für die Konzeption funktionaler Frühwarn- und Monitoringsysteme von Mureignissen essentiell sind. Nachfolgend werden *Hypothese 1*, „Frühwarnsysteme von Muren sind nicht einheitlich, sondern müssen an lokale natürliche und gesellschaftliche Gegebenheiten angepasst werden“, sowie *Hypothese 2*, „ein effektives Frühwarnsystem für Muren muss eine eindeutige, nutzerangepasste Alarmkommunikation beinhalten“, beantwortet.

Die Analyse offenbart eine komplexe Landschaft verschiedener Messsensoren und -techniken, an denen sich Fachkräfte aus verschiedenen Disziplinen beteiligen. Viele der Monitoringstationen in Österreich, aber auch in Nachbarländern wie Italien (z.B. BLASONE et al. 2014; COVIELLO 2023) und Schweiz (z.B. KAITNA 2022a; STÄHLI et al. 2015) wurden und werden für kurz- oder langfristige Forschungszwecke, z.B. am IAN der BOKU, verwendet. Sensoren

zur Erkennung von Muren stellen lediglich ein einzelnes Element innerhalb umfassender Frühwarnsysteme für Ereignisse dar. Weitere wesentliche Bestandteile umfassen Einheiten zur Datenerfassung und -verarbeitung sowie Mechanismen zur Alarmverbreitung. Ein zentrales Problem stellt die Gestaltung der Warnmeldung dar: Um die Effektivität von Frühwarnsystemen zu steigern, ist eine differenzierte Gestaltung von Warnmeldungen erforderlich, die sowohl die Gefahrintensität als auch -dringlichkeit berücksichtigt und zielgruppenspezifisch angepasst wird, was für *Hypothese 2* von Relevanz ist. Wesentlich dabei ist die Glaubwürdigkeit, Verständlichkeit und die Bereitstellung klarer Handlungsanweisungen (KUNZ-PLAPP 2008; MAYER et al. 2010a; SCHMIDT 2003). Effiziente Krisenkommunikationsstrategien sind wichtig, um das Verständnis und die Akzeptanz von Veränderungen im Management von Naturgefahren zu fördern – hierbei spielen die Bereitstellung präziser Informationen und die Berücksichtigung lokaler Gegebenheiten eine Schlüsselrolle (HOUSTON et al. 2015; SPENCE et al. 2016; STEELMAN & MCCAFFFREY 2013). Die Definition von Niederschlagsschwellenwerten zur Ermittlung minimaler Auslösebedingungen für Murgänge stellt einen etablierten methodischen Ansatz dar. Allerdings unterliegen sie einer erheblichen Variabilität, die vor allem auf regionale Differenzen zurückzuführen ist (z.B. Vegetationsdecke, geologische Beschaffenheit und Wildbachverbauungen) sowie auf prädisponierende Faktoren, die mit der rezenten Historie des Einzugsgebiets in Verbindung stehen (z.B. vorangegangene Niederschlagsereignisse und Verfügbarkeit von Sedimenten) (HÜRLIMANN et al. 2019). Die Anfälligkeit von Frühwarn- und Monitoringanlagen auf Fehlsignale erfordert eine fortlaufende Optimierung der Vorhersagemodelle und der Schwellenwertjustierung, um die Präzision zu erhöhen und Fehlalarme zu minimieren. Weitere Problemfelder sind die hohen Kosten, bürokratischen Herausforderungen und die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Pflege und Aktualisierung von Schutzmaßnahmen, um deren langfristige Effektivität zu sichern (BRAUNER et al. 2015; PATEK 2008). Privatunternehmen wie die Firma Sommer Messtechnik GmbH vermarkten verschiedene Messsensoren. Wie das *Fallbeispiel 1* verdeutlicht, erreichen die Anfangsinvestitionen für die Anlagen Summen im Bereich von über hunderttausend Euro. Diese Kosten werden in der Regel unter verschiedenen Stakeholdern aufgeteilt, einschließlich der Landesstraßenverwaltung und den betroffenen Gemeinden sowie im Rahmen von Projektförderungen der EU.

Mittels (Ultra-) Schall- oder Elektromagnetischer (Radar) Wellen können Abfluss- und Pegelmessungen durchgeführt werden. Bewegungen im Messfeld werden durch Methoden wie Laserscanning und Fernerkundungstechnologien detektiert. Geophone und seismische Sensoren

zur Messung von Bodenerschütterungen zeigen eine hohe Robustheit und Unabhängigkeit gegenüber Tageszeiten und Wetterbedingungen. Externe Quellen von Bodenvibrationen, wie sie durch Fahrzeuge, Menschen oder Tiere verursacht werden, können dennoch Fehlalarme auslösen. Die Ultraschalltechnologie, die für ihre präzisen, nicht-invasiven Messungen bekannt ist, offenbart eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit, welche ihre Einsatzfähigkeit limitiert. Ein gemeinsames Merkmal von Geophonen, Reißleinen und GNSS-Geräten ist ihre Kapazität zur Echtzeitüberwachung und Alarmierung, was sie für die Früherkennung von Murgängen unentbehrlich macht. Besonders Reißleinen haben jedoch Bedarf an Wiederherstellung nach Aktivierung. Die begrenzte Verbreitung von Puls-Doppler-Radarsystemen kann auf die substantiellen Anforderungen zurückgeführt werden, die diese Technologie hinsichtlich der Rechenleistung und Speicherkapazität stellt. Die Platzierung von Messsensoren stellt insbesondere bei instabilen Uferböschungen eine Herausforderung dar. (ARATTANO & MARCHI 2008; MATJAZŽ et al. 2014)

Die Zuverlässigkeit von Frühwarn- und Monitoringsystemen ist maßgeblich durch die strategische Platzierung der Sensoren im Überwachungsgebiet, den Faktor Zeit, die Festlegung der Messintervalle und der Schwellenwerte sowie die Präzision und Auflösung der erfassten Daten determiniert. Eine Positionierung nahe der Ablagerungszone verbessert die Warnzuverlässigkeit, kürzt aber die Reaktionszeit. Höhergelegene Installationen erlauben frühere Warnungen, erhöhen jedoch das Fehlalarmrisiko (KIENHOLZ 2003). Dies bekräftigt die *Hypothese 1*, denn Frühwarnsysteme sind somit nicht einheitlich, sondern müssen auf lokale Gegebenheiten wie Topographie und klimatische Bedingungen abgestimmt werden, jedoch auch anthropologische Faktoren berücksichtigen. Festzuhalten ist, dass dezentralisierte Systeme eine flexiblere Anpassungsfähigkeit auf lokale Bedürfnisse haben (VILLAG-RAN DE LEÓN et al. 2006). Im Laufe der Literatursammlung wurde festgestellt, dass Warnmeldungen nicht direkt an die Bewohner*innen der in den österreichischen Einzugsgebieten liegenden Gemeinden gehen, sondern an Akteure, die für den Einsatz im Fall von bedrohlicher Muraktivität verantwortlich sind. Muren-Frühwarnsysteme werden u.a. für die Frühwarnung an nahegelegenen Baustellen eingesetzt, welche meistens wegen Schutzbauarbeiten vor Ort in der Gefahrenzone tätig sind. Eine Frühwarnung kann beispielsweise in Form von akustischen Signalen (Sirene), SMS-Ketten, E-Mails und/oder roter Ampelschaltung für gefährdete Straßenbereiche erfolgen wie aus den Berichten zu u.a. den Einzugsgebieten Gadriabach, Gallenzerkogelmure, Dawinbach, Lattenbach und Suggadinbach ersichtlich wird (HÜBL et al. 2003; JÄGER & SCHMIDT 2006; KIENBERGER 2020; SCHÖFFL et al. 2020).

10. Zusammenfassung

Schlussfolgernd werden in diesem Kapitel die wichtigsten Inhalte der Arbeit resümiert. Die steigende Vulnerabilität der Gesellschaft gegenüber Naturkatastrophen stellt ein sich dynamisch entwickelndes Problemfeld dar, dessen Relevanz in der Zukunft weiter zunehmen wird (RUDOLF-MIKLAU 2018). Rund 67 Prozent des österreichischen Territoriums befinden sich in Gebieten, die von Wildbächen und Lawinen betroffen sind. Muren stellen eine der bedrohlichen Naturgefahren in Österreich dar – in Fällen größerer Murereignisse kann das Volumen der transportierten Feststoffe mehrere hunderttausend Kubikmeter erreichen. Insofern müssen Frühwarn- und Monitoringsysteme bestimmte Anforderungen erfüllen wie die Implementierung verständlicher Schwellenwerte, Präzision der Messinstrumente, verständliche Warnkommunikation für alle beteiligten Akteure und Robustheit der Anlage gegenüber diversen Umweltbedingungen sowie mechanischen Einflüssen. Ferner ist die Gewährleistung einer autonomen Energieversorgung und Datenübertragung essentiell, um eine zuverlässige Funktionsweise auch in entlegenen Regionen sicherzustellen. Die Unterschiede in der technischen Konfiguration und Funktionsweise von Frühwarn- und Monitoringsystemen für Muren manifestieren sich in den räumlichen und zeitlichen Dimensionen sowie in der Art und Anzahl der integrierten Ressourcen. Ebenso eine Rolle spielen die Möglichkeiten der Kommunikationswege und die Finanzierung dieser Systeme.

Zusammenfassend erfordert die effektive Nutzung der Messsensoren eine sorgfältige Berücksichtigung ihrer individuellen Stärken und Schwächen – die Wahl des geeigneten Sensorentyps muss daher spezifische Bedingungen wie soziale Aspekte und umweltbedingte Anforderungen des Überwachungsstandorts berücksichtigen. Letztere sind wichtig für z.B. die Frage nach der optimalen Sensorplatzierung für die Muren-Detektion. Internationale Kooperationsprojekte und multidisziplinäre Zusammenarbeit fördern den Austausch von Daten und leistet somit einen wesentlichen Beitrag für Forschungen auf diesem Gebiet. Soziale Ansätze umfassen das Spektrum von der Sensibilisierung der Bevölkerung bis hin zur individuellen Verantwortungsübernahme. Es ist entscheidend, eine umfassende Aufklärungskampagne für die Öffentlichkeit und insbesondere für Endnutzer*innen zu initiieren, um das Bewusstsein und Verständnis für das Risiko von Muren und die Funktionsweise der Frühwarnsysteme zu erhöhen. Durch die Einbeziehung der Gemeinschaft kann beispielsweise das „*Verantwortungsproblem*“ überwunden und die Nachfrage nach rein baulichen Schutzmaßnahmen reduziert werden, da gerade Verbauung wiederum ein Problem für die natürliche Umwelt darstellt – dies könnte zu einer nachhaltigeren

Risikomanagementstrategie führen. Prinzipiell wird hier festgehalten, dass präventives Handeln mehr Gewichtung erhalten sollte als reaktive Maßnahmen.

11. Ausblick

Im Laufe des Forschungsprozesses dieser Arbeit wurde festgestellt, dass es auf diesem Themengebiet eine Priorisierung von Risiken gibt. Dies bedeutet, dass man sein Augenmerk darauf lenkt, welche Naturgefahren die größten Risiken darstellen und dann dementsprechende Ressourcen zuweist. Besonders die frühzeitige Muren-Erkennung erfordert komplexe Überwachungssysteme, da Berichte zeigen, wie hoch die Fehlermarge ist und welche Herausforderungen noch in der Praxis zu bewältigen sind. Es gab und gibt Projekte zu Monitoring von Murgängen, aber eine sehr begrenzte Auswahl an Frühwarnsystemen, die tatsächlich eine Warnmeldung im Fall der Fälle generieren und Maßnahmen wie Verkehrssperren einleiten. Ein Faktum ist, dass die Festlegung der Schwellenwerte für die Datenerfassung von Murgängen eine große Herausforderung für Fachkräfte darstellt (SCHELLANDER 2023). Es bedarf einer größeren Erfahrungssammlung auf diesem Gebiet, um optimale Werte besser definieren und Fehlalarme reduzieren zu können. Weiterführend bleibt zu analysieren, welche Priorität man derartigen Systemen zukünftig einräumen muss und kann – und zu guter Letzt, wie sich der Stand der Technik (etwa durch den Einsatz von KI) und Wissenschaft mit Blick auf die Klimadebatte verändern wird.

Ein weiterer Diskussionsansatz wäre ebenso die Frage nach dem Stellenwert von Frühwarnsystemen für Muren im Vergleich zu anderen Maßnahmen wie Entwässerungssystemen, Murschutznetzen, Schutzbauten oder individuellen Zonenregelungen. Nicht auszuschließen ist die Bewusstseinsbildung der Bevölkerung im Rahmen der Implementierung von Frühwarnanlagen auf lokaler oder regionaler Ebene. In technischer Hinsicht ist die Weiterentwicklung von Sensortechnologien für verbesserte Frühwarnkapazitäten von Vorteil. Insbesondere im Bereich Präzision und Vorwarnzeiten, da Zeit eine wichtige Rolle im Umgang mit Naturkatastrophen spielt. Neuere Ansätze, wie die Verwendung von Big Data und künstlicher Intelligenz, könnten einen möglichen Einfluss auf die Präzision und Verfeinerung von Vorhersagemodellen haben. Wie weit sich die Systeme mittels künstlicher Intelligenz adaptieren lassen, ist noch zu untersuchen. Dabei darf nicht vergessen werden, dass Finanzierung und gesetzliche Rahmenbedingungen entscheidend für die effektive Umsetzung von Frühwarn- und Monitoringanlagen sind. Schlussendlich, soll nochmals die Bedeutung einer nutzerangepassten Warnkommunikation

hervorgehoben werden. Wie können Benachrichtigungen personalisiert werden, um auch sprachliche Vielfalt zu berücksichtigen, Menschen mit besonderen Bedürfnissen zu erreichen und eindeutige, handlungsorientierte Anweisungen zu inkludieren? Einige Studien zum Thema Krisenkommunikation sind bereits im Umlauf (siehe auch u.a. STEELMAN & MCCAFFREY 2013), dennoch sollte es zukünftig nicht nur bei theoretischen Rahmenwerken bleiben.

Literaturverzeichnis

- AIGNER, P., KUSCHEL, E., SKLAR, L., ZANGERL, C., HRACHOWITZ, M., HAAS, T., HÜBL, J. & KAITNA, R. (2023). Debris-flow activity and sediment dynamics in the landslide-influenced Lattenbach catchment, Austria. – In: E3S Web of Conferences, 415(04001). – o.O., 1-4; <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341504001>.
- ANDRECS, P., HAGEN, K., FROMM, R., GRAUER, P., HÖLLER, P., KLEBINDER, K., KOHL, B., LANG, E., MARKAT, G., PERZL, F., STARY, U. & ZEIDLER, A. (2010): AdaptEvent. Analyse der Sicherheit und Genauigkeit von Bemessungswerten bei gravitativen alpinen Naturgefahren und Ableitung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel. Endbericht des BFW im Auftrag des BMLFUW im Rahmen des EU Projekts AdaptAlp (Adaptation to Climate Change in the Alpine Space). – Wien, 19ff.
- ARATTANO, M. & MARCHI, L. (2008): Systems and Sensors for Debris-flow Monitoring and Warning. – In: GAO, Y. & LEVY, J. (Hrsg.): Sensors for Disaster and Emergency Management Decision Making, 8(4). – o.O., 2436-2452; <https://doi.org/10.3390/s8042436>.
- ARATTANO, M., ABANCÓ, C., COVIELLO, V. & HÜRLIMANN, M. (2014): Processing the ground vibration signal produced by debris flows, The methods of amplitude and impulses compared. – In: Computer & Geosciences, 73. – o.O., 17–27; <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.08.005>.
- ARISTOTLE (o.J.): ARISTOTLE; online unter: <http://pilot.aristotle.ingv.it/#:~:text=ARISTOTLE%20is%20a%20pilot%20project,hazard%20scalable%20early%2Dwarning%20service> (20.01.2024).
- ARNHARDT, C., ASCH, K., AZZAM, R., BILL, R., FERNANDEZ-STEGER, T. M., HOMFELD, S. D., KALLASH, A., NIEMEYER, F., RITTER, H., TOLOCZYKI, M. & WALTER, K. (2007): Sensor based Landslide Early Warning System, SLEWS. Development of a geoservice infrastructure as basis for early warning systems for landslides by integration of real-time sensors. – In: Geotechnologien Science Report, Early Warning Systems in Earth Management, 10. – o.O., 75-88.
- BASHER, R. (2006): Global early warning systems for natural hazards, systematic and people-centred. – In: DANTON, J. (Hrsg.): Philosophical Transactions of the Royal Society A, 364(1845). – Bonn, 2167-2182; <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1819>.
- BELL, R., MAYER, J., POHL, J., GREIVING, S. & GLADE, T. (2010a): Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung. – Essen, 9-10.
- BELL, R., MAYER, J., POHL, J., GREIVING, S. & GLADE, T. (2010b): Zusammenfassung und Perspektiven. – In: BELL, R., MAYER, J., POHL, J., GREIVING, S. & GLADE, T. (Hrsg.): Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung. – Essen, 244-247.
- BERGNER, A., ACQUESTA, A., HEIDMANN, F., ZEILINGER, G., TOST-VAL, J., OLEN, S., WALZ, A., BOOKHAGEN, B. & TORRES-ACOSTA, V. (2018): Improving hazard communication using online map services and interactive visualization approaches: experiences from cooperation with administration partners in Saxony (Germany), Argentina and Colombia. – In: PETROW, T., BRONSTERT, A., THIEKEN, A. & VOGEL, K. (Hrsg.): International Conference on >Natural Hazards and Risks in a Changing World<, 4-5 October 2018, University of Potsdam, Session 4. – Potsdam, 35.
- BLASONE, G., CAVALLI, M., MARCHI, L. & CAZORZI, F. (2014): Monitoring sediment source areas in a debris-flow catchment using terrestrial laser scanning. – In: BONIFACIO, E., EGLI, M. & TEMME, A. (Hrsg.): Catena, 123. – o.O., 23-36; <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.07.001>.

- BML (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft) (2023): Ereignisdokumentation 2022. Für den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung. – Wien, 7-93.
- BML (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft) (o.J.): Wildbäche und Muren; online unter: <https://info.bml.gv.at/themen/wald/wald-und-naturgefahren/leben-mit-naturgefahren/wildbaeche.html> (11.01.2024).
- BRAUNER, M., BRAUNSTINGL, R. & LAIMER, H. J. (2015): Monitoring von Gravitativen Massenbewegungen. – In: ÖROK (Hrsg.): Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung, Fachliche Empfehlungen & Materialienband, 193. – Wien, 241-245.
- BUDIMIR, M., MONDINI, A., ROSSI, M., ARNHARDT, C. & ROBBINS, J. (2022): Framework for implementation of a landslide early warning forecast model in developing countries. Challenges and lessons from SHEAR, SHEAR Programme, FCDO/NERC. – o.O. 7-10.
- CHIARI, M., BERKTOLD, M., JÄGER, G. & HÜBL, J. (2016): Geschiebemesstelle im Suggadinbach (Vorarlberg). – In: VEREIN DER DIPLOMINGENIEURE DER WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): Feststofftransport und Sedimentmanagement, 80(177). – Wien, 50-59.
- CLIMATE DATA (o.J.): Klima Sankt Gallenkirch (Österreich); online unter: https://de.climate-data.org/europa/oesterreich/vorarlberg/sankt-gallenkirch-162432/?utm_content=cmp=true (11.03.2024).
- CORTES, J., FRIGERIO, S., SCHENATO, L., PASUTO, A. & STERLACCHINI, S. (2012): Review of the current risk management strategies in Europe for hydro-meteorological hazards at protection and emergency level. – In: KLIJN, F. & SCHWECKENDIEK, T. (Hrsg.): Comprehensive Flood Risk Management, Research for Policy and Practice. – London, 971-980; <https://doi.org/10.1201/b13715-142>.
- COVIELLO, V. (2023): Debris-flow detection for early warning purposes, recent advances, open problems, and future challenges. – In: E3S Web of Conferences, 415(03007). – o.O., 1-4; <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341503007>.
- DAVIES, T.R.H. (1988): Debris flow surges, a laboratory investigation. – In: VISCHER, D. (Hrsg.): Mitteilungen Der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, 96. ETH. – Zürich, 21.
- DRAGOVIĆ, N., VULEVIĆ, T., BAJRIC, M., HÜBL, J., PORTO, P. & BLINKOV, I. (2022): Strategic and Legal Framework of Torrential Flood Control in Some Western Balkan and EU Countries. – In: MILUTINOVIĆ, S. & ŽIVKOVIĆ, S. (Hrsg.): Prevention and Management of Soil Erosion and Torrential Floods. – o.O., 42-73; <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8459-0.ch003>.
- EKER, R., AYDIN, A. & HÜBL, J. (2018): Unmanned aerial vehicle (UAV)-based monitoring of a landslide, Gallenzerkogel landslide (Ybbs-Lower Austria) case study. – In: Environmental Monitoring and Assessment, 190(28). – o.O., 1-14; <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6402-8>.
- FRANDL, T. (2024): Neueste Information zu Frühwarnsystemen von Muren. – E-Mail vom 31.01.2024, persönliche Kommunikation.
- FRANDL, T., TSCHANN, B., TROY, K. & WÖHRER-ALGE, M. (2014): Erfahrungen mit Mess- und Warnsystemen im Bundesland Vorarlberg. – In: VEREIN DER DIPLOMINGENIEURE DER WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): Naturgefahrenbeobachtung und Monitoring, 78(173). – Wien, 168-187.
- GEENEN, E. M. (2009): Warnung der Bevölkerung. – In: BBK (Hrsg.): Gefahren und Warnung. Schriften der Schutzkommission, 1, Schutzkommission beim Bundesministerium des Innern. – Bonn, 59-102.
- GEODATA (o.J.): Stangenextensometer; online unter: <https://www.geodata.com/produkte/stangenextensometer/>

- (22.02.2024).
- GEOPRAEVENT (2022): Technologie-Handbuch für die Überwachung von gravitativen Naturgefahren – Zürich, 7-40.
- GEOSPHERE AUSTRIA (o.J.): INADEF; online unter: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/wetter/inadef> (20.01.2024).
- GEOSPHERE AUSTRIA (2023): Überblick zu den mittels Online-Recherchen erhobenen gravitativen Massenbewegungen in Österreich. Monatsbericht Februar 2023. – Wien, 2-6.
- GHAEMI, E., FOELSCHE, U., KANN, A. & FUCHSBERGER, J. (2021): Evaluation of Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) precipitation analysis using a dense rain-gauge network in south-eastern Austria. – In: Hydrology and Earth System Sciences, 25. – Vienna & Graz, 4335–4356; <https://doi.org/10.5194/hess-25-4335-2021>.
- GLADE, T., MERGILI, M., & SATTLER, K. (Hrsg.) (2020): ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 31-44; <https://doi.org/10.14220/9783737010924>.
- GRAF, C., BADOUX, A. & DUFOUR, F., FRITSCHI, B., MCARDELL, B. W., RHYNER, J., KUNTNER, R., TEYSSEIRE, P. & NIGG, U. (2007): Alarmsystem für murgangfähige Wildbächen, Beispiel Illgraben. – In: HAUENSTEIN, W. (Hrsg.): Wasser Energie Luft, 99(2). ETH. – Zürich, 119-128; <https://doi.org/10.5169/seals-940122>.
- GUZZETTI, F., GARIANO, S. L., PERUCCACCI, S., BRUNETTI, M. T., MARCHESINI, I., ROSSI M. & MELILLO, M. (2020): Geographical landslide early warning systems. – In: Earth-Science Reviews, 200(102973). – o.O., 2; <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102973>.
- HAGEN, K. & LECHNER, V. (2020): Neuer Frühwarnsystem-Prototyp für Mureignisse verfügbar; online unter: <https://www.bfw.gv.at/entwicklung-fruehwarnsystem-muren/> (20.01.2024).
- HAGEN, K., LECHNER, V. & DEMMLER, C. (2022): INADEF, Einsatz eines Frühwarnsystems als Anpassungsstrategie für Muren unter veränderten Rahmenbedingungen. – In: WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): Naturgefahren im Klimawandel, 190. – Wien, 68-86.
- HAIDEN, T., KANN, A., WITTMANN, C., PISTOTNIK, G., BICA, B. & GRUBER, C. (2011): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. – In: BUNKERS, M. (Hrsg.): Weather and Forecasting, 26(2). – Boston, 166-183; <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222451.1>.
- HATTENBERGER, D. & WÖLLIK, A. (2008): (Naturgefahren-)Mess- und Frühwarnsysteme. Einzelne rechtliche Aspekte. – In: GIESE, K. & JAHNEL, D. (Hrsg.): Baurechtliche Blätter, 11(3). – Wien, 89-101; <https://doi.org/10.1007/s00738-008-0395-1>.
- HEISTERKAMP, T., THIEBES, B. & GLADE, T. (2016): Frühwarnsysteme vor Naturgefahren für den Bevölkerungsschutz. Beispiele für Unwetter und gravitative Massenbewegungen. – In: KUHLMHEY, M. & FREUDENBERG, D. (Hrsg.): Krisenmanagement, Bevölkerungsschutz. Lehrstoffsammlung. – Berlin, 535-570.
- HÜBL, J. (2024): Neueste Information zu Frühwarnsystemen von Muren. – E-Mail vom 29.01.2024, persönliche Kommunikation.
- HÜBL, J., GANAHL, E., KAITNA, R. & MOSER, M. (2003): WLS Report 56, Dokumentation Monitoring Lattenbach. Grundlagen für die Murenprognose, Errichtung von Messsystemen, Ereignisdokumentation.

- Endbericht (unveröffentlicht). Institut für Alpine Naturgefahren und forstliches Ingenieurwesen – Wien;
https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H87000/H87100/IAN_Reports/REP0056.pdf.
- HÜBL, J. & MATJAZ, M. (2014): Monitoring von Murgängen. – In: VEREIN DER DIPLOMINGENIEURE DER WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): Naturgefahrenbeobachtung und Monitoring, 78(173). – Wien, 50-65.
- HÜBL, J., PICHLER, J., JOCHAM, P. & KOSCHUCH, R. (2014): IAN Report 149, Automatische Detektion alpiner Massenbewegungen mittels Hochfrequenzradartechnik, Naturgefahren-Radar. Endbericht. Institut für Alpine Naturgefahren und forstliches Ingenieurwesen. – Wien, 5-33; https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H87000/H87100/DAN_IAN_Reports/Rep149_-_2Endbericht.pdf (20.01.2024).
- HÜBL, J., SCHIMMEL, A. & KOSCHUCH, R. (2017): Monitoring of Debris Flows with an Improved System Setup at the Lattenbach Catchment, Austria. – In: MIKOŠ, M., CASAGLI, N., YIN, Y. & SASSA, K. (Hrsg.): Advancing Culture of Living with Landslides, Diversity of Landslide Forms 4. – Cham, 707; https://doi.org/10.1007/978-3-319-53485-5_53.
- HÜBL, J., SCHIMMEL, A. & VOLK, G. (2016): IAN Report 147, Automatic Detection of Alpine Mass Movements (AMM-Detection). Endbericht. Institut für Alpine Naturgefahren und forstliches Ingenieurwesen. – Wien, 1-18; https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H87000/H87100/DAN_IAN_Reports/Rep147_-_Automatic_Detection_of_Alpine_Massmovements.pdf (28.01.2024).
- HÜBL, J., SITTER, F., TOTSCHNIG, R., SCHNEIDER, A. & KRAWTSCHUK, A. (2009): IAN Report 111, Historische Ereignisse. Band 4: Zusammenstellung und Analyse dokumentierter Ereignisse in Österreich bis 2009. Endbericht. Institut für Alpine Naturgefahren und forstliches Ingenieurwesen. – Wien, 56-70; https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H87000/H87100/IAN_Reports/REP0111_Band4.pdf (10.02.2024).
- HÜRLIMANN, M., COVIELLO, V., BEL, O., GUO, X., BERTI, M., GRAF, C., HÜBL, J., MIYATA, S., SMITH, J. B. & YIN, H.-Y. (2019): Debris flow monitoring and warning. Review and examples. – In: Earth-Science Reviews, 199(102981). – o.O., 1-26; <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102981>.
- INTERPRAEVENT (2024): Interpraevent; online unter: <https://interpraevent2024.at/about/interpraevent> (21.01.2024).
- ISDR (International Strategy for Disaster Reduction) (o.J.): Basics of early warning; online unter: <https://www.unisdr.org/2006/ppew/whats-ew/basics-ew.htm> (25.01.2024).
- JÄGER, G. (2004): IAN Report 81, Vorläufiger Endbericht des Projektes Großmaßstäbliche Murenversuche Gaschiera, MUR.EXPO. Endbericht. Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen und Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Gebietsbauleitung Bludenz. – Wien, 9-10; 27-31; 45-76; https://boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H87000/H87100/IAN_Reports/REP0081_Schesa_2004.pdf.
- JÄGER, G. & MOSER, M. (2008): Numerische hydrologische und hydraulische Simulation der Auswirkungen einer möglichen Flutwelle im Rahmen einer Risikoanalyse und Risikomanagements am Suggadinbach. – In: INTERPRAEVENT (Hrsg.): Conference Proceedings, 1. – o.O., 355-365.
- JÄGER, G. & SCHMIDT, R. (2006): Risk analysis and risk management in Maesstobel. – In: LORENZINI, G., BREBBIA, C. A. & EMMANOULOU, D.E. (Hrsg.): Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense and Debris Flows, Wit Transactions on Ecology and the Environment, 90. – Southampton, 295-299; <https://doi.org/10.2495/DEB060281>.

- JUEN, G. (2002): Niederschrift über die am Freitag, den 13.12.2002 um 20.00 Uhr im Gemeindeamt St. Gallenkirch stattgefundene 30. Sitzung der Gemeindevertretung von St. Gallenkirch; online unter: https://www.gemeindearchiv.at/dokumente/?tx_gemeinde_pi1%5Bfileval%5D=20021213_GVE030.pdf&tx_gemeinde_pi1%5BshowUid%5D=35690 (14.03.2024).
- KAITNA, R. (2022a): Einfluss des Klimawandels auf Wildbacheinzugsgebiete mit speziellem Fokus auf Muren. – In: WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): Naturgefahren im Klimawandel, 190. – Wien, 50-56.
- KAITNA, R. (2022b): Muren, wenn es ganz dick kommt. – In: NATIONALPARKKRAT HOHE TAUERN (Hrsg.): Tagungsband, Risikomanagement für Alpine Naturgefahren. – Matrei, 10-12.
- KAITNA, R. & HUBER, T. (2017): Debris flow activity in permafrost regions in Austria during the 20th century. – In: MATJAZ, M., CASAGLI, N., YIN, Y. & SASSA, K. (Hrsg.): Advancing Culture of Living with Landslides. Diversity of Landslide Forms, 4. – o.O., 421-427; https://doi.org/10.1007/978-3-319-53485-5_50.
- KAITNA, R., PRENNER, D. & HÜBL, J. (2020): Muren. – In: GLADE, T., MERGILI, M. & SATTLER, K. (Hrsg.): ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. – Wien, 489-510; <https://doi.org/10.14220/9783737010924>.
- KAITNA, R., PRENNER, D., SWITANEK, M., STOFFEL, M., MARAUN, D. & HRACHOWITZ, M. (2023): Impact of climate change on hydro-meteorological trigger conditions for debris flows in Austria. – In: E3S Web of Conferences, 415(05011). – o.O., 1-3; <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341505011>.
- KHANKEH, H. R., HOSSEINI, S.H., FARROKHI, M., HOSSEINI M. A. & NASIR AMANAT (2019): Early warning system models and components in emergency and disaster, a systematic literature review protocol. – In: LOCKWOOD, C. (Hrsg.): Systematic Reviews, 8(315). – o.O., 1-3; <https://doi.org/10.1186/s13643-019-1211-5>.
- KIENBERGER, C. (2020): Akquirierung von Katastrophenvorsorgeflächen am Beispiel der Gallenzerkogel mure. – In: WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): Naturgefahren im Klimawandel, 186. – Wien, 70-78.
- KIENHOLZ, H. (2003): Early Warning Systems Related to Mountain Hazards. – In: ZSCHAU, J. & KÜPPERS, A. (Hrsg.): Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction. – Berlin & Heidelberg, 555-564; https://doi.org/10.1007/978-3-642-55903-7_75.
- KOSCHUCH, R. (o.J.): Pulse-Doppler Radar-System for Alpine Mass Movement Monitoring. – o.O., 1-8; Privates Dokument der Firma IBTP Koschuch e.U.
- KOSCHUCH, R. (2024): Neueste Information zu Frühwarn- und Monitoringsystemen von Muren. – E-Mail vom 03.02.2024 und Videokonferenz vom 15.02.2024, persönliche Kommunikation.
- KOSCHUCH, R., JOCHAM, P. & HÜBL, J. (2015): One Year Use of High-Frequency RADAR Technology in Alpine Mass Movement Monitoring. Principles and Performance for Torrential Activities. – In: LOLLINO, G., ARATTANO, M., RINALDI, M., GIUSTOLISI, O., MARECHAL, J.-C. & GRANT, G. E. (Hrsg.): Engineering Geology for Society and Territory, 3(14) – o.O., 69-72; https://doi.org/10.1007/978-3-319-09054-2_14.
- KREISLER, A., JÄGER, G., JANU, S. & MOSER, M. (2014): Das Geschiebemessprogramm der Wildbach- und Lawinenverbauung. Entwicklung, Status und zukünftige Perspektiven. – In: VEREIN DER DIPLOM-INGENIEURE DER WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): Naturgefahrenbeobachtung und Monitoring, 78(173). – Wien, 136-147.

- KUNZ-PLAPP, T. (2008): Vorwarnung, Vorhersage und Frühwarnung. – In: FELGENTREFF, C. & GLADE, T. (Hrsg.): Naturrisiken und Sozialkatastrophen. – Berlin & Heidelberg, 213-223.
- KURILLA, L. & FUBELLI, G. (2022): Global debris flow susceptibility based on a comparative analysis of a single global model versus a continent-by-continent approach. – In: *Natural Hazards*, 113(1). – o.O., 527-546; <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05313-y>.
- LEBEN MIT NATURGEFAHREN (o.J.): Monitoring- und Frühwarnsysteme - eine präventive Maßnahme gegen Naturgefahren; online unter: <https://www.naturgefahren.at/entwicklungundinnovation/monitoringsysteme.html> (25.01.2024).
- LIU, L., DENG, J. & TANG, Y. A. (2023): Dynamic Management and Integration Framework for Models in Land slide Early Warning System. – In: ISPRS (Hrsg.): *International Journal of Geo-Information*, 12(5):198. – Basel, 1-17; <https://doi.org/10.3390/ijgi12050198>.
- LOTTER, M. & HABERLER, A. (2013): Geogene Naturgefahren, gravitative Massenbewegungen und ihre Ursachen. – In: *Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, 100. – o.O., 1-17; online unter: https://trustedspotter.eu/content/images/BerichteGeolBundesanstalt_100_0001-0017.pdf (11.02.2024).
- MAMODIS (o.J.): Map of all installation sites of the MAMODIS-System; online unter: <http://mamodis.ddns.net> (28.01.2024).
- MATJAZ, M., MAČEK, M., JOŠT, S. & HÜBL, J. (2014): Practice Guidelines on Monitoring and Warning Technology for Debris Flow. – In: ALPINE SPACE project START_it_up - WP 5.4. – o.O., 12-25.
- MAYER, J., BELL, R., POHL, J., GREIVING, S. & RÖHRS, M. (2010b): Integratives Frühwarnsystem, Leitfaden. – In: BELL, R., MAYER, J., POHL, J., GREIVING, S. & GLADE, T. (Hrsg.): *Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung.* – Essen, 248-254.
- MAYER, J., GLADE, T., THIEBES, B. & BELL, R. (2010a): Integrative Frühwarnsysteme. – In: BELL, R., MAYER, J., POHL, J., GREIVING, S. & GLADE, T. (Hrsg.): *Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung.* – Essen, 17-22.
- MICHOUD, C., BAZIN, S., BLIKRA, L. H., DERRON, M. H. & JABOYEDOFF, M. (2013): Experiences from site-specific landslide early warning systems. – In: *Natural Hazards and Earth System*, 13. – o.O., 2659-2673; <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2659-2013>.
- MITTELSTÄDT, M. & SFC ENERGY (2022): Immer und überall zuverlässiger, umweltfreundlicher, wetter-unabhängiger Strom. Netzferne Energieversorgung mit Brennstoffzellen für Frühwarnsysteme. – In: WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): *Naturgefahren im Klimawandel*, 190. – Wien, 114-153.
- MIZUYAMA, T., LARONNE, J. B., NONAKA, M., SAWADA, T., SATOFUKA, Y., MATSUOKA, M., YAMASHITA, S., SAKO, Y., TAMAKI, S., WATARI, M., YAMA-GUCHI, S. & TSURUTA, K. (2010): Calibration of a passive acoustic bedload monitoring system in Japanese mountain rivers. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5091. – o.O., 296-318.
- MOSER, M. (2024): Neueste Information zu Frühwarnsystemen von Muren. – E-Mail vom 25.01.2024, persönliche Kommunikation.
- MÖDLHAMMER, H. (2014): Die realpolitische Bedeutung der WLW aus Sicht der österreichischen Gemeinden. – In: RUDOLF-MIKLAU, F. & PICHLER, A. (Hrsg.): *Retrospektive, Perspektive, Vision. 130 Jahre Wildbach- und Lawinenverbauung.* – Wien, 50-55.

- NEURAUTER, H. (2023): Wie die Warnkommunikation für den Gebirgspass Hahtennjoch L266 funktioniert. – E-Mail vom 28.11.2023, persönliche Kommunikation.
- NOESLIDE (2024): Mission; online unter: <https://www.noeslide.at/index.php/de/> (30.01.2024).
- OSTERMANN, M. & AMABILE, A. S. (2019): Frühwarn- und Monitoringsysteme in Österreich, Zustandsbericht 2019. – Wien, 7-106.
- ÖROK (Österreichische Raumordnungskonferenz) (2016): Rahmen, Erläuterungen, Empfehlungen & Beispiele. – In: ÖROK (Hrsg.): ÖROK-Empfehlung Nr. 54, Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung. – Wien, 3-29.
- PATEK, M. (2008): Preface. – In: AUSTRIAN SERVICE FOR TORRENT AND AVALANCHE CONTROL (Hrsg.): Early Warning and Monitoring Systems in Austria. Report 2008. – Wien, 3.
- RUDOLF-MIKLAU, F. (2009): Naturgefahren-Management in Österreich. Vorsorge, Bewältigung, Information. – Wien, 17-38; 117-128; 196-201.
- RUDOLF-MIKLAU, F. (2018): Umgang mit Naturkatastrophen (1. Auflage) – Wien.
- RUDOLF-MIKLAU, F. (2022): Klimawandel und Extremereignisse, Erwarte das Unerwartete! – In: WILD BACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): Naturgefahren im Klimawandel, 190. – Wien, 12-14.
- RUDOLF-MIKLAU, F. (2023): Neueste Information zu Frühwarnsystemen von Muren. – E-Mail vom 10.12.2023, persönliche Kommunikation.
- SAUERMOSER, S. (2019): Editorial – In: VEREIN DER DIPLOMINGENIEURE DER WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): Gefahrenzonenplanung, 83(184). – Wien, 13.
- SAUERMOSER, S. & STEINER, H. (2016): WLW und BWV. Eine facettenreiche Partnerschaft. – In: VEREIN DER DIPLOMINGENIEURE DER WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): Perspektiven der Wildbach- und Lawinenverbauung, 80(178). – Wien, 146-158.
- SAUSGRUBER, J. T. (2018): Monitoring bei Massenbewegungen / Hangbewegungen. – In: RUDOLF-MIKLAU, F. & HÜBL, J. (Hrsg.): Stand der Technik im Naturgefahren-Ingenieurwesen, 24, Fachtagung an der Universität für Bodenkultur Wien am 21.-23.Februar 2018. – Wien, 19-20.
- SATTLER, K. & MEHLHORN, S. (2020): Überblick alpiner Naturgefahren in Österreich. – In: GLADE, T., MERGILI, M. & SATTLER, K. (Hrsg.): ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich – Wien, 45-58; <https://doi.org/10.14220/9783737010924>.
- SÄTTELE M. & BRÜNDL M. (2015): Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren. WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz BABS. – Bern, 11-23; <https://www.geopraevent.ch/wp-content/uploads/2016/05/88067dbroschuerepraxishilfe.pdf> (18.01.2024).
- SCHIMMEL, A. (2024): Neueste Information zu Frühwarnsystemen von Muren. – E-Mail vom 04.03.2024, persönliche Kommunikation.
- SCHIMMEL, A. & BERTI, M. (2023): MAMODIS, A low-cost monitoring system for debris flows based on infrasound and seismic signals. – In: E3S Web of Conferences, 415(03025). – o.O., 1-4; <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341503025>.
- SCHLÖGL, M., FUCHS, S., SCHEIDL, C., & HEISER, M. (2021): Trends in torrential flooding in the Austrian Alps. A combination of climate change, exposure dynamics, and mitigation measures. – In: Climate Risk Management, 32(100294) – o.O., 1-23; <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100294>.
- SCHMIDT, H. S. (2003): Technical Requirements for Early Warning Systems. – In: ZSCHAU, J. & KÜPPERS,

- A. N. (Hrsg.): Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction. International Conference on Early Warning Systems for the Reduction of Natural Disasters 1998 Potsdam. – Berlin & Heidelberg., 817-822; https://doi.org/10.1007/978-3-642-55903-7_110.
- SCHMIDT, R., SAUSGRUBER, T. & FRANDL, T. (2014): Schwerpunkte im Fachbereich Monitoring und Messtechnik des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung. – In: VEREIN DER DIPLOM-INGENIEURE DER WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (Hrsg.): Naturgefahrenbeobachtung und Monitoring, 78(173). – Wien, 106-119.
- SHELLANDER, H. (2023): Das Starkregeninformationssystem am Gebirgspass Hahntennjoch L266. – E-Mails vom 10.11.2023 und vom 14.11.2023, persönliche Kommunikation.
- SCHÖFFL, T. & HÜBL, J. (2020): Frühwarnkonzept Strengen-Dawinbach. – o.O., 4-14.
- SCHÖFFL, T., NAGL, G. & HÜBL, J. (2020): Monitoring und Frühwarnung von Murgängen. Vergleichsanalyse und Einsatzoptimierung eines Puls-Kompressionsradars. – In: DISASTER COMPETENCE NETWORK AUSTRIA (Hrsg.): Disaster Research Days 2020, Konferenzband. – o.O., 182-185.
- SINABELL, F. (2014): Herausforderungen der Wildbach- und Lawinenverbauung angesichts soziodemographischer und ökonomischer Entwicklungen. – In: RUDOLF-MIKLAU, F. & PICHLER, A. (Hrsg.): Retrospektive - Perspektive – Vision. 130 Jahre Wildbach- und Lawinenverbauung. – Wien, 50-55.
- STÄHLI, M., SÄTTELE, M., HUGGEL, C., MCARDELL, B. W., LEHMANN, P., VAN HERWIJNEN, A., BERNE, A., SCHLEISS, M., FERRARI, A., KOS, A., OR, D. & SPRINGMAN, S. M. (2015): Monitoring and prediction in early warning systems for rapid mass movements. – In: Natural Hazards and Earth System Sciences, 15. – o.O., 905-917; <https://doi.org/10.5194/nhess-15-905-2015>.
- STEELMAN, T. A. & MCCAFFREY, S. (2013): Best practices in risk and crisis communication. Implications for natural hazards management. – In: Natural Hazards, 65(1). – o.O., 683-705; <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0386-z>.
- STOFFEL, M. & CORONA, C. (2018): Future winters glimpsed in the Alps. – In: Nature Geoscience, 11(7). – o.O., 458-460; <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0177-6>.
- THIEBES, B. & GLADE, T. (2016): Landslide early warning systems. Fundamental concepts and innovative applications. – In: AVERSA, S., CASCINI, L., PICARELLI, L. & SCAVIA, C. (Hrsg.): Landslides and engineered slopes. Experience, theory and practice. Proceedings of the 12th international symposium on landslides. – Naples, 12-19.
- THUT, A. (2003): Grundbau-Taschenbuch, Geotechnische Messverfahren. – Mönchaltorf, 1-66.
- TRIGG, M. (2014): Design of early warning systems; online unter: <https://www.cdema.org/virtuallibrary/index.php/charim-hbook/methodology/9-preparedness-planning/9-1-early-warning-systems> (28.01.2024).
- VILLAGRAN DE LEÓN, J. C., BOGARDI, J., DANNENMANN, S. & BASHER, R. (2006): Early Warning Systems in the context of Disaster Risk Management. – In: Entwicklung & Ländlicher Raum, 40(2). – o.O., 23-25; https://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/docs/ELR_dt_23-25.pdf (21.01.2024).
- VORARLBERGER LANDESREGIERUNG (o.J.): Das Starkregen- und Hochwasserereignis des August 2005 in Vorarlberg. Ein Bericht des Amtes der Vorarlberger Landesregierung; online unter: <https://www.vol.at/2009/01/naturereignisdokumentatio1.pdf> (15.03.2024).
- WIECZOREK, G. F. & GLADE, T. (2005): Climatic factors influencing occurrence of debris flow. – In: JAKOB, M. & HUNGR, O. (Hrsg.): Debris-Flow Hazards and Related Phenomena. – Berlin, 325-362; https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_14.

WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (2008): Frühwarn- und Monitoringsysteme in Österreich, Zustandsbericht 2008. – Wien, 4-98.

WORLD LANDSLIDE FORUM (2023): Themes and Sessions; online unter:

<https://wlf6.org/forum-themes/#section-6322ba0-2> (18.01.2024).

ZANGERL, C., PRAGER, C., BRANDNER, R., BRÜCKL, E., FELLI, W., TENTSCHERT, E.-H., & SCHÖNLAUB, H. P. (2008): Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. – In: Geo.Alp, 5. – o.O., 1-51; online unter: https://www2.uibk.ac.at/downloads/c715/geoalp_5_08/01zangerl_et_al_sml.pdf (22.02.2024).

Anhang

A1: Teilausschnitt der SMS an die Straßenmeisterei Zams

A2: Das Hochfrequenz-Radar und seine Funktionsweise

A3: Prinzip des Monitoringsystems am Lattenbach

A4: Ampelregelung und Referenzgeländemodell am Suggadinbach

A1: Teilausschnitt der SMS an die Straßenmeisterei Zams



Abbildung 11 - SMS: Information über die Ampelschaltung. (NEURAUTER 2023)

A2: Das Hochfrequenz-Radar und seine Funktionsweise

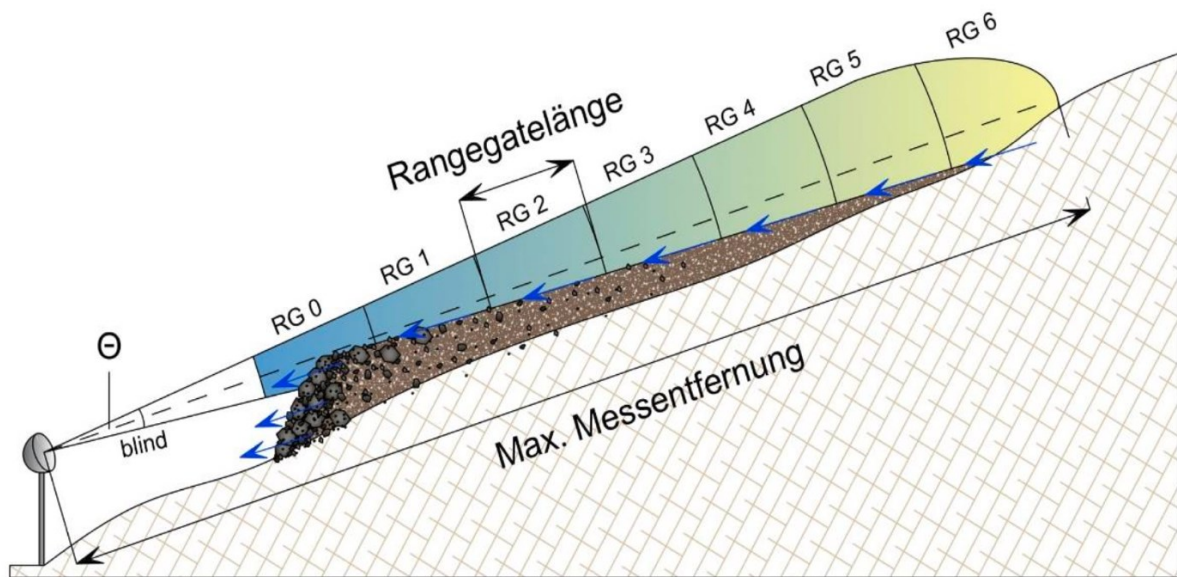


Abbildung 12 - Das Hochfrequenz-Radar und die Einteilung der Rangesegates. (SCHÖFFL & HÜBL 2020: 6)



Abbildung 13 - Komponente des Frühwarnsystems am Dawinbach. (SCHÖFFL et al. 2020: 185)

A3: Prinzip des Monitoringsystems am Lattenbach

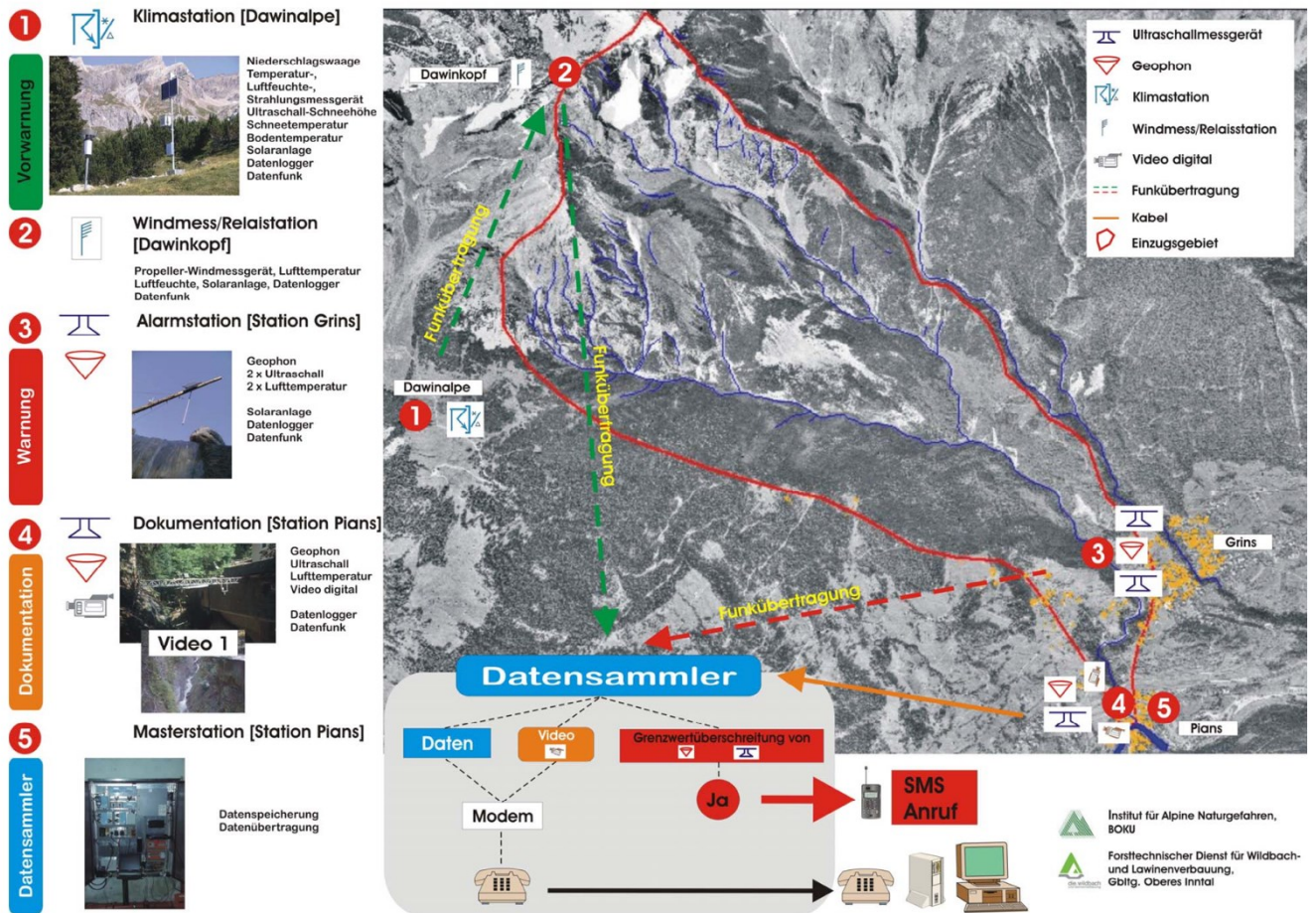


Abbildung 14 - Prinzip des Monitoringsystems am Lattenbach. (HÜBL et al. 2003: 7)

A4: Ampelregelung und Referenzgeländemodell am Suggadinbach



Abbildung 15 - Ampel auf der Gargellener Straße. (JÄGER & SCHMIDT 2006: 298)



Abbildung 16 - Mit UAV erstelltes Geländemodell des Messbereiches. (CHIARI et al. 2016: 54)